

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**SUELOS MODIFICADOS ESTABILIZADOS CON PUZOLANAS
NATURALES ACTIVADAS ALCALINAMENTE PARA TÉCNICAS
DE CONSTRUCCIÓN CON TIERRA**

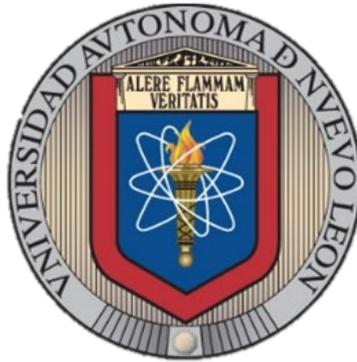
Por

CESAR AUGUSTO LAGUNA TORRES

**Como requisito parcial para obtener el Grado de
DOCTORADO EN INGENIERÍA con Orientación en Materiales de Construcción**

Febrero, 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**SUELOS MODIFICADOS ESTABILIZADOS CON PUZOLANAS NATURALES
ACTIVADAS ALCALINAMENTE PARA TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN
CON TIERRA**

Por
CESAR AUGUSTO LAGUNA TORRES

**Como requisito parcial para obtener el Grado de
DOCTORADO EN INGENIERÍA con Orientación en Materiales de Construcción**

Director de Tesis:
Dr. Javier Rodrigo González López

Codirectora de Tesis:
Dra. Mayra Zyzlila Figueroa Torres

Asesor:
Dr. Miguel Ángel Guerra Cossío

Asesores externos:
Dr. Luis Fernando Guerrero Baca
Dr. Hugo Alejandro Guillén Trujillo

Febrero, 2025



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

2025/enero/15

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de TESIS, cuyo título es **“SUELOS MODIFICADOS ESTABILIZADOS CON PUZOLANAS NATURALES ACTIVADAS ALCALINAMENTE PARA TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN CON TIERRA”**, que presenta el **M. C. CÉSAR AUGUSTO LAGUNA TORRES**, como requisito parcial para obtener el grado de **DOCTOR EN INGENIERÍA**, del programa **DOCTORADO EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**. Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,


DR. JAVIER RODRIGO GONZÁLEZ LÓPEZ

Evaluador



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Av. Pedro de Alba S/N Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455
81 8329 4000 ext. 4060 • www.fic.uanl.mx



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

2025/01/16

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de TESIS, cuyo título es **“SUELOS MODIFICADOS ESTABILIZADOS CON PUZOLANAS NATURALES ACTIVADAS ALCALINAMENTE PARA TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN CON TIERRA”**, que presenta el M. C. CÉSAR AUGUSTO LAGUNA TORRES, como requisito parcial para obtener el grado de DOCTOR EN INGENIERÍA, del programa DOCTORADO EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento CUENTA con la calidad y nivel CIENTÍFICO, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea APROBADO.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,

Dra. Mayra Zyzlila Figueroa Torres

Evaluador



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Av. Pedro de Alba S/N Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455

81 8329 4000 ext. 4060 • www.fic.uanl.mx



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

FECHA: 2025/01/14

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de TESIS, cuyo título es "SUELOS MODIFICADOS ESTABILIZADOS CON PUZOLANAS NATURALES ACTIVADAS ALCALINAMENTE PARA TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN CON TIERRA", que presenta el M. C. CÉSAR AUGUSTO LAGUNA TORRES, como requisito parcial para obtener el grado de DOCTOR EN INGENIERÍA, del programa DOCTORADO EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento CUENTA con la calidad y nivel CIENTÍFICO, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea APROBADO.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,

Dr. Miguel Ángel Guerra Cossío

Evaluador





Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

UNIDAD XOCHIMILCO, División de Ciencias y Artes para el Diseño

2024/diciembre/20

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL

SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

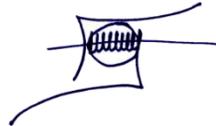
Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es **“SUELOS MODIFICADOS ESTABILIZADOS CON PUZOLANAS NATURALES ACTIVADAS ALCALINAMENTE PARA TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN CON TIERRA”**, que presenta el **M. C. CÉSAR AUGUSTO LAGUNA TORRES**, como requisito parcial para obtener el grado de **DOCTOR EN INGENIERÍA**, del programa **DOCTORADO EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictaminó que este trabajo sea **APROBADO**.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente
“Casa Abierta al Tiempo”

**Dr. Luis Fernando Guerrero Baca**

Evaluador

Profesor Investigador Titular. Departamento de Síntesis Creativa.

Email: luisfg1960@yahoo.es



Área Conservación y Reutilización del Patrimonio Edificado
División de Ciencias y Artes Para el Diseño
Calzada del Hueso 1100, Col. Villa Quietud, Coyoacán, CP 04960
Edificio P, Cubículo 317
México, D.F. Tel. 54837300 Ext. 3572



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS

FACULTAD DE INGENIERÍA C-I



Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. 04/02/2025.

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es **“SUELOS MODIFICADOS ESTABILIZADOS CON PUZOLANAS NATURALES ACTIVADAS ALCALINAMENTE PARA TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN CON TIERRA”**, que presenta el **M. C. CÉSAR AUGUSTO LAGUNA TORRES**, como requisito parcial para obtener el grado de **DOCTOR EN INGENIERÍA**, del programa **DOCTORADO EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**. Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,



Dr. Hugo Alejandro Guillén Trujillo

Evaluador



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Comprobante de corrección de escritos

ESTUDIANTE PROFESOR

NOMBRE: CÉSAR AUGUSTO LAGUNA TORRES

TIPO DE DOCUMENTO: ARTÍCULO TESIS PI OTRO

TÍTULO DEL DOCUMENTO A REVISAR:
SUELOS MODIFICADOS ESTABILIZADOS CON
PUZOLANAS NATURALES ACTIVADAS ALCALINAMENTE
PARA TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN CON TIERRA.

RECOMENDACIONES ADICIONALES:

REALIZAR LAS CORRECCIONES QUE APAREZCAN
EN LA TESIS IMPRESA.

*Este documento certifica la corrección DEFINITIVA del trabajo arriba
identificado, en los aspectos: ortográfico, metodológico y estilístico.

Nombre y firma de quien corrigió: _____

Arq. Ramón Longoria Ramírez
Asesor Profesional de Apoyo

Dr. Gerardo Fajardo San Miguel

Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación
Ciudad Universitaria, 8 de enero de 2025

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



Av. Universidad S/N Cd. Universitaria
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P.P. 66455
Tels. (81) 14424400 ext. 4448 | 83294000 ext. 7216, 7234
correo electrónico: spi.fc@uanl.mx

Clave: FOR-SPI-14; Revisión: 02; Página 1 de 1



SUELOS MODIFICADOS Y ESTABILIZADOS A TRAVÉS DE PUZOLANAS
NATURALES PARA TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN CON TIERRA

Aprobación de la Tesis

Dr. Javier Rodrigo González López
Director de Tesis

Dra. Mayra Zyzlila Figueroa Torres
Codirectora de Tesis

Dr. Miguel Ángel Guerra Cossío
Asesor

Dr. Luis Fernando Guerrero Baca
Asesor Externo

Dr. Hugo Alejandro Guillén Trujillo
Asesor externo

Dr. Gerardo del Jesús Fajardo San Miguel
Subdirector de Estudios de Posgrado

AGRADECIMIENTOS

Primero y, ante todo, agradezco a Dios, por darme vida, salud, fuerza y sabiduría para enfrentar cada desafío que me llevó a este momento tan importante. Su guía y protección me han acompañado siempre, incluso en los momentos más difíciles, recordándome que todo esfuerzo, al final tiene su recompensa.

A mi familia, mi mayor pilar y motivo para seguir adelante. A mis padres, Ing. Cesar Augusto Laguna Vázquez y Dra. María de los Ángeles Torres Vera, por enseñarme desde pequeño el valor del trabajo duro, la humildad y la perseverancia. Gracias por creer en mí incluso cuando las cosas parecían imposibles. Cuando parecía ya no tener fuerzas, ustedes fueron mi impulso para seguir. A mis hermanas, Ángeles y Mariel, y a mis cuñados, gracias por su apoyo incondicional y por estar a mi lado durante este largo camino. A mis sobrinos, Pablo César y Santiago, por su amor, y por recordarme, que la felicidad y la alegría están en las cosas más sencillas. A ustedes siempre gracias, Este logro también es de ustedes.

Mi gratitud infinita y mi más profundo reconocimiento al Dr. Javier Rodrigo González López, mi director de tesis, por su invaluable guía, paciencia y compromiso. Su capacidad para orientar, cuestionar y motivar me ha llevado más allá de lo que alguna vez creí posible. No solo me impulsó a crecer en lo académico y profesional, sino también en lo personal. Cada consejo suyo se convirtió en una enseñanza de vida. Su confianza en mí me permitió seguir adelante. Gracias por desafiarme a dar siempre lo mejor de mí, por su tiempo, su paciencia y su apoyo. Este logro no habría sido posible sin su guía. Le estaré eternamente agradecido.

A los miembros del comité doctoral, Dra. Mayra Zyzlila Figueroa Torres, Dr. Luis Fernando Guerrero Baca y Dr. Hugo Alejandro Guillén Trujillo, gracias por sus valiosos comentarios y seguimiento, que enriquecieron este trabajo. Y en especial, al Dr. Miguel Ángel Guerra Cossío, por su apoyo constante y por el tiempo dedicado en este proceso. Sus observaciones y su compromiso fueron fundamentales, aportando no solo conocimiento, sino también motivación en los momentos clave.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), mi alma máter, y a la Facultad de Ingeniería Civil, por ser el espacio donde crecí académica y profesionalmente. Al Cuerpo Académico de Materiales Alternativos en Ingeniería (CAMAI), por su apoyo y confianza. Al Departamento de Inspección de Infraestructura (DINFRA), por abrir nuevas puertas y permitirnos soñar con proyectos que realmente impacten nuestra sociedad. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo brindado a través de la beca de doctorado. Al Departamento de Verificación y Control de Materiales de Construcción (VCMC), donde muchos de mis aprendizajes cobraron vida; M.C. Javier Rocha e Ing. Sergio Castillo, gracias. Y al Laboratorio de Terracerías, por ser un espacio que no solo sirvió para realizar experimentos, sino también para aprender, crecer y compartir experiencias con grandes personas; Ing. Rafael Luna, Jaime Luna, Mario Siller, Oscar Rojas y Alejandro Rodríguez.

Este logro no es solo mío; es el reflejo del esfuerzo conjunto de muchas personas e instituciones que, de una u otra manera, han dejado una huella en este camino. A todos ustedes, de corazón, gracias por creer en mí, y estar para mí. Tengan por seguro que, así como ustedes han estado para mí, yo siempre estaré para ustedes. A todos gracias.



TABLA DE CONTENIDO

| Capítulo | Página |
|--|---------------|
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1 Planteamiento del problema | 4 |
| 1.2 Justificación..... | 8 |
| 1.3 Hipótesis | 9 |
| 1.4 Objetivo general | 10 |
| 1.5 Objetivos específicos..... | 10 |
| CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA..... | 12 |
| 2.1 Marco teórico..... | 12 |
| 2.1.1 Construcción con tierra | 12 |
| 2.1.2 Técnicas de construcción con tierra..... | 13 |
| 2.1.3 Estabilizantes de suelo utilizados en la construcción con tierra | 15 |
| 2.1.4 Puzolanas naturales como estabilizante en suelos | 17 |
| 2.1.5 Método para la valoración ambiental..... | 20 |
| 2.1.6 Cálculo de los índices eMergéticos..... | 27 |
| 2.2 Antecedentes..... | 30 |
| 2.2.1 Suelos utilizados para técnicas de construcción con tierra | 30 |
| 2.2.2 Normativa de construcción con tierra..... | 31 |
| 2.2.3 Ensayos de caracterización para la clasificación de suelos..... | 32 |



| | | |
|--------------------------------------|---|----|
| 2.2.4 | Estabilización de suelos con cemento..... | 35 |
| 2.2.5 | Estabilización de suelos con cal..... | 35 |
| 2.2.6 | Estabilización de suelos con puzolanas naturales..... | 36 |
| 2.2.7 | Determinación del porcentaje de estabilizante en suelos..... | 40 |
| 2.2.8 | Durabilidad en la construcción con tierra..... | 41 |
| 2.2.9 | Activación alcalina..... | 43 |
| CAPÍTULO 3. MÉTODO EXPERIMENTAL..... | | 46 |
| 3.1 | Etapa 1: Caracterización de materiales..... | 46 |
| 3.2 | Etapa 2: Selección de suelos..... | 47 |
| 3.3 | Etapa 3: Evaluación de las dosificaciones..... | 47 |
| 3.4 | Etapa 4: Resistencia a compresión y durabilidad de los suelos estabilizados | 48 |
| 3.5 | Etapa 5: Análisis eMergético..... | 48 |
| 3.6 | Desarrollo de la Etapa 1: Caracterización de materiales..... | 49 |
| 3.6.1 | Identificación y tratamiento de la puzolana natural y activadores.... | 49 |
| 3.6.2 | Identificación de bancos de suelos..... | 50 |
| 3.6.3 | Ubicación de bancos de suelo identificados en el Estado de Nuevo León | 51 |
| 3.6.4 | Recolección de muestras de los 5 Bancos de suelos..... | 55 |
| 3.6.5 | Preparación de muestras para su clasificación..... | 58 |



| | | |
|--|---|----|
| 3.6.6 | Granulometría de las muestras representativas de los bancos | 60 |
| 3.6.7 | Límites de Consistencia o Límites de Atterberg..... | 62 |
| 3.6.8 | Prueba de compactación dinámica y contenido de agua..... | 65 |
| 3.6.9 | Ensayo Valor de soporte de California (CBR) | 65 |
| 3.6.10 | Caracterización de suelos y puzolana por FRX | 66 |
| 3.6.11 | Caracterización de suelos y puzolana por DRX | 66 |
| 3.7 | Desarrollo de la etapa 2: Selección de suelos..... | 67 |
| 3.7.1 | Recolección de los bancos seleccionados | 67 |
| 3.8 | Desarrollo de la Etapa 3: Evaluación de las dosificaciones | 67 |
| 3.8.1 | Evaluación de las dosificaciones monitoreo de pH y CE | 68 |
| 3.8.2 | Comparativa de CE y calorimetrías | 71 |
| 3.9 | Desarrollo de la Etapa 4: Resistencia a compresión y durabilidad de los suelos estabilizados | 72 |
| 3.9.1 | Fabricación de cubos 5 x 5 cm..... | 73 |
| 3.9.2 | Resistencia a la compresión | 74 |
| 3.9.3 | Durabilidad de los suelos estabilizados | 75 |
| 3.10 | Desarrollo de la Etapa 5: Análisis energético | 78 |
| CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN | | 79 |
| 4.1 | Resultados de la Etapa 1: Caracterización de los materiales..... | 79 |
| 4.1.1 | Comparación granulométrica con Normas UNE y NTC | 79 |



| | | |
|--|---|-----|
| 4.1.2 | Comparativa de los límites de consistencia con Normas UNE y NTC | 81 |
| 4.1.3 | Comparación y análisis de resultados FRX | 82 |
| 4.1.4 | Comparación y análisis de resultados DRX..... | 85 |
| 4.2 | Resultados de la Etapa 2: Selección de suelos | 87 |
| 4.2.1 | Selección de B1 Zayre y B3 Maqlub | 87 |
| 4.3 | Resultados de la Etapa 3: Evaluación de las dosificaciones..... | 88 |
| 4.3.1 | Monitoreo de pH y CE..... | 88 |
| 4.3.2 | Comparativa de Calorimetrías y CE | 90 |
| 4.4 | Resultados de la Etapa 4: Resistencia a compresión y durabilidad..... | 96 |
| 4.4.1 | Resistencia a compresión de cubos 5 x 5 cm..... | 96 |
| 4.4.2 | Durabilidad de los especímenes de suelos estabilizados | 99 |
| 4.4.3 | Desempeño y oposición a la deformación de los suelos estabilizados | 100 |
| 4.4.4 | Caracterización y análisis de los suelos estabilizados | 101 |
| 4.5 | Resultados de la Etapa 5: Análisis eMergético | 113 |
| CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | | 121 |
| 5.1 | Conclusiones | 121 |
| 5.2 | Recomendaciones..... | 124 |
| 5.3 | Productos generados..... | 125 |



| | |
|----------------------------------|-----|
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 127 |
| ANEXOS | 149 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 Conceptos de jerarquía de transformación de energía. (a) Todas las unidades se ven juntas; (b) unidades separadas por escala; (c) las unidades como una red [40–42] | 22 |
| Figura 2 Símbolos de energía [39] | 24 |
| Figura 3 Resumen: Principales flujos de energía y materiales..... | 28 |
| Figura 4 Diagrama de 3 brazos | 28 |
| Figura 5 Vista aérea general de la ubicación de los 5 bancos identificados en el estado de Nuevo León (B1 Zayre, B2 Cumbres, B3 Maqlub, B4 Moya y B5 Cerritos) . | 51 |
| Figura 6 Ubicación B1 Zayre 25°49'26.7"N 100°25'16.1"W | 51 |
| Figura 7 Ubicación B2 Cumbres 25°46'06.4"N 100°28'38.7"W | 52 |
| Figura 8 Ubicación B3 Maqlub 25°58'11.6"N 100°16'30.4"W | 53 |
| Figura 9 Ubicación B4 Moya 25°58'25.6"N 100°17'05.0"W | 53 |
| Figura 10 Ubicación B5 Cerritos 25°46'59.3"N 100°25'14.4"W | 54 |
| Figura 11 Recolección de porción representativa de B1 Zayre | 55 |
| Figura 12 Recolección de porción representativa de B2 Cumbres | 56 |
| Figura 13 Recolección de porción representativa de B3 Maqlub | 56 |
| Figura 14 Recolección de porción representativa de B4 Moya | 57 |
| Figura 15 Recolección de porción representativa de B5 Cerritos..... | 58 |
| Figura 16 Preparación de las muestras representativas, tendido, secado y disgregado | 59 |
| Figura 17 Cuarteo y reducción de las muestras para obtener fracciones representativas..... | 60 |

| | |
|--|----|
| Figura 18 Granulometría parte gruesa (Izq.) y parte fina (Dcha.) B1 Zayre..... | 61 |
| Figura 19 Granulometría parte gruesa (Izq.) y parte fina (Dcha.) B2 Cumbres .. | 61 |
| Figura 20 Granulometría parte gruesa (Izq.) y parte fina (Dcha.) B3 Maqlub | 61 |
| Figura 21 Granulometría parte gruesa (Izq.) y parte fina (Dcha.) B4 Moya..... | 62 |
| Figura 22 Granulometría parte gruesa (Izq.) y parte fina (Dcha.) B5 Cerritos | 62 |
| Figura 23 Muestras de limite líquido, limite plástico y barra de contracción B1 Zayre | 63 |
| Figura 24 Muestras de Limite de Consistencia B2 Cumbres | 63 |
| Figura 25 Muestras de limite líquido, limite plástico y barra de contracción B3 Maqlub | 64 |
| Figura 26 Muestras de limite líquido, limite plástico y barra de contracción B4 Moya | 64 |
| Figura 27 Muestras de limite líquido, limite plástico y barra de contracción B5 Cerritos..... | 65 |
| Figura 28 Mezclas de 10g de material con 1g de cera inerte | 66 |
| Figura 29 Botellas con solución para la medición y monitoreo de pH y CE | 70 |
| Figura 30 Botellas con soluciones en proceso de curado en horno..... | 70 |
| Figura 31 Botella con soluciones con puzolana (Izq.) y Cal (Dcha.) a un día de reacción | 71 |
| Figura 32 Molde de diseño propio para la elaboración de cubos 5x5 cm..... | 73 |
| Figura 33 Ensayo a compresión de cubos 5 x 5 cm | 74 |
| Figura 34 Esquema de ensayo de erosión por goteo, dimensiones en mm | 76 |
| Figura 35 Esquema de ensayo de erosión acelerada, dimensiones en mm | 77 |

| | |
|--|-----|
| Figura 36 Comparativa granulométrica de los 5 bancos de suelos UNE-41410 y NTC-5324 | 79 |
| Figura 37 DTP Puzolana Natural | 80 |
| Figura 38 Comparativa de plasticidad de los 5 bancos de suelos UNE-41410 y NTC-5324 | 81 |
| Figura 39 Gráfica de comparación FRX | 83 |
| Figura 40 Comparación de Difractogramas de los 5 Bancos de Suelos y sus compuestos principales | 85 |
| Figura 41 Evolución y monitoreo de CE en soluciones de mezcla B1Z (Izq.) y B3M (Dcha.) | 90 |
| Figura 42 Comparaciones de CE (a) y Calorimetría: Calor acumulado (b) y Calor liberado (c) para los sistemas 1-4..... | 92 |
| Figura 43 Comparaciones de CE (a) y Calorimetría: Calor acumulado (b) y Calor liberado (c) para los sistemas 5, 6, 7 y 12..... | 94 |
| Figura 44 Comparaciones de CE para los sistemas 5, 6, 7 y 12..... | 94 |
| Figura 45 Comparaciones de CE para los sistemas 8-12..... | 95 |
| Figura 46 Resistencia a compresión B1Z cubos a/c 0.5..... | 97 |
| Figura 47 Resistencia a compresión B3M cubos a/c 0.5..... | 97 |
| Figura 48 Resistencia a compresión B1Z cubos a/c 1.1..... | 98 |
| Figura 49 CBR al 100% de B1Z (Izq.) y B3M (Dcha.) estabilizados con cal y PA. | 101 |
| Figura 50 Comparativa DRX B1Z después de la estabilización..... | 103 |
| Figura 51 Comparativa DRX B3M después de la estabilización..... | 103 |

| | |
|---|-----|
| Figura 52 Comparativa FTIR B1Z después de la estabilización..... | 105 |
| Figura 53 Comparativa FTIR B3M después de la estabilización..... | 105 |
| Figura 54 Comparativa TGA-DTG B1Z después de la estabilización..... | 107 |
| Figura 55 Comparativa TGA-DTG B3M después de la estabilización | 108 |
| Figura 56 Micrografías de suelos naturales y estabilizados con cal y PA | 110 |
| Figura 57 Espectroscopía de Dispersión de Energía (EDS) para de suelos estabilizados con Cal y PA..... | 111 |
| Figura 58 Resumen de Espectroscopía de Dispersión de Energía (EDS) para de suelos estabilizados con Cal y PA..... | 112 |
| Figura 59 Diagrama simplificado de flujos de energía en la producción de suelo estabilizado con cal | 114 |
| Figura 60 Diagrama simplificado de flujos de energía en la producción de suelo estabilizado con PA..... | 114 |
| Figura 61 Índice de carga ambiental e Índice de sustentabilidad ambiental para suelo estabilizado con cal comparado con un suelo estabilizado con PA..... | 120 |
| Figura 62 Porcentajes de granulometría B1 Zayre..... | 149 |
| Figura 63 Porcentajes de granulometría B2 Cumbres..... | 149 |
| Figura 64 Porcentajes de granulometría B3 Maclub..... | 150 |
| Figura 65 Porcentajes de granulometría B4 Moya..... | 150 |
| Figura 66 Porcentajes de granulometría B5 Cerritos | 151 |
| Figura 67 Resultados de LL, LP y LC B1 Zayre | 152 |
| Figura 68 Resultados de LL, LP y LC B2 Cumbres | 152 |
| Figura 69 Resultados de LL, LP y LC B3 Maclub | 153 |

| | |
|---|-----|
| Figura 70 Resultados LL, LP y LC B4 Moya | 153 |
| Figura 71 Resultados LL, LP y LC B5 Cerritos..... | 154 |
| Figura 72 Curva de compactación B1 Zayre..... | 155 |
| Figura 73 Curva de compactación B2 Cumbres..... | 156 |
| Figura 74 Curva de compactación B3 Maqlub..... | 157 |
| Figura 75 Curva de compactación B4 Moya..... | 158 |
| Figura 76 Curva de compactación B5 Cerritos | 159 |
| Figura 77 Cargas (Lb) de penetración B1 Zayre..... | 161 |
| Figura 78 Porcentaje de CBR B1 Zayre..... | 162 |
| Figura 79 Cargas (Lb) de penetración B2 Cumbres..... | 164 |
| Figura 80 Porcentaje de CBR B2 Cumbres..... | 164 |
| Figura 81 Cargas (Lb) de penetración B3 Maqlub..... | 166 |
| Figura 82 Porcentaje de CBR B3 Maqlub..... | 166 |
| Figura 83 Cargas (Lb) de penetración B4 Moya..... | 168 |
| Figura 84 Porcentaje de CBR B4 Moya..... | 168 |
| Figura 85 Cargas (Lb) de penetración B5 Cerritos | 170 |
| Figura 86 Porcentaje de CBR B5 Cerritos | 170 |
| Figura 87 Difractograma B1 Zayre | 172 |
| Figura 88 Difractograma B2 Cumbres | 172 |
| Figura 89 Difractograma B3 Maqlub | 173 |
| Figura 90 Difractograma B4 Moya | 173 |
| Figura 91 Difractograma B5 Cerritos..... | 174 |
| Figura 92 Diagrama de clasificación de Grava ASTM D 2487 06 B1 Zayre | 175 |



Figura 93 Diagrama de clasificación de Arena ASTM D 2487 06 B1 Zayre 176

Figura 94 Diagrama de clasificación de Finos ASTM D 2487 06 B1 Zayre 177

Figura 95 Diagrama de clasificación de Grava ASTM D 2487 06 B2 Cumbres
..... 178

Figura 96 Diagrama de clasificación de Arena ASTM D 2487 06 B2 Cumbres
..... 179

Figura 97 Diagrama de clasificación de Finos ASTM D 2487 06 B2 Cumbres 180

Figura 98 Diagrama de clasificación de Grava ASTM D 2487 06 B3 Maqlub .182

Figura 99 Diagrama de clasificación de Arena ASTM D 2487 06 B3 Maqlub .183

Figura 100 Diagrama de clasificación de Finos ASTM D 2487 06 B3 Maqlub 184

Figura 101 Diagrama de clasificación de Grava ASTM D 2487 06 B4 Moya ..185

Figura 102 Diagrama de clasificación de Arena ASTM D 2487 06 B4 Moya ..186

Figura 103 Diagrama de clasificación de Finos ASTM D 2487 06 B4 Moya ...187

Figura 104 Diagrama de clasificación de Grava ASTM D 2487 06 B5 Cerritos
..... 188

Figura 105 Diagrama de clasificación de Arena ASTM D 2487 06 B5 Cerritos
..... 189

Figura 106 Diagrama de clasificación de Finos ASTM D 2487 06 B5 Cerritos 190

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 1 Criterios aplicables a la selección de materiales de construcción medioambientalmente correctos. (Fábregas, et. al., 1998)..... | 18 |
| Tabla 2 Ejemplo de una tabla de evaluación eMergética..... | 25 |
| Tabla 3 Resumen de los principales índices del análisis eMergético (Álvarez et al.,) | 25 |
| Tabla 4 Normativa BTC en el mundo | 31 |
| Tabla 5 Objetivos y alcance de las Normas Mexicanas sobre Geotecnia aplicadas a Técnicas de Construcción con Tierra | 33 |
| Tabla 6 Tabla de autores y variables..... | 37 |
| Tabla 7 Diseño de mezclas para determinar el porcentaje de estabilizante y la reactividad de los materiales | 69 |
| Tabla 8 Tabla de comparativas para calorimetría y CE B1Z y B3M..... | 72 |
| Tabla 9 Comparación y suma de porcentajes de los bancos de materiales | 82 |
| Tabla 10 Ensayos de durabilidad a 28 días de muestras de suelos naturales y estabilizadas con cal y PA..... | 99 |
| Tabla 11 eMergía calculada para la producción de suelo estabilizado con cal.. | 115 |
| Tabla 12 eMergía calculada para la producción de suelo estabilizado con PA . | 116 |
| Tabla 13 Cuantificación para el cálculo de eMergía Solar | 117 |
| Tabla 14 Cuantificaciones para el cálculo de eMergía de maquinaria..... | 117 |
| Tabla 15 Compactación Dinámica B1 Zayre | 155 |
| Tabla 16 Determinación de contenido de agua B1 Zayre | 155 |
| Tabla 17 Compactación Dinámica B2 Cumbres..... | 156 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 18 Determinación del contenido de agua B2 Cumbres..... | 156 |
| Tabla 19 Compactación Dinámica B3 Maqlub..... | 157 |
| Tabla 20 Determinación del contenido de agua B3 Maqlub..... | 157 |
| Tabla 21 Compactación Dinámica B4 Moya..... | 158 |
| Tabla 22 Compactación Dinámica B4 Moya..... | 158 |
| Tabla 23 Compactación Dinámica B5 Cerritos..... | 159 |
| Tabla 24 Determinación del contenido de agua B5 Cerritos..... | 159 |
| Tabla 25 CBR y Expansión B1 Zayre..... | 160 |
| Tabla 26 Registro de Cargas de Penetración B1 Zayre..... | 161 |
| Tabla 27 Correcciones de carga de presión B1 Zayre..... | 162 |
| Tabla 28 CBR y Expansión B2 Cumbres..... | 162 |
| Tabla 29 Registro de Cargas de Penetración B2 Cumbres..... | 163 |
| Tabla 30 Correcciones de carga de presión B2 Cumbres..... | 164 |
| Tabla 31 CBR y Expansión B3 Maqlub..... | 165 |
| Tabla 32 Registro de Cargas de Penetración B3 Maqlub..... | 165 |
| Tabla 33 Correcciones de carga de presión B3 Maqlub..... | 166 |
| Tabla 34 CBR y Expansión B4 Moya..... | 167 |
| Tabla 35 Registro de Cargas de Penetración B4 Moya..... | 167 |
| Tabla 36 Correcciones de carga de presión B4 Moya..... | 168 |
| Tabla 37 CBR y Expansión B5 Cerritos..... | 169 |
| Tabla 38 Registro de Cargas de Penetración B5 Cerritos..... | 169 |
| Tabla 39 Correcciones de carga de presión B5 Cerritos..... | 170 |



| | |
|--|-----|
| Tabla 40 Resumen de resultados B1 Zayre Límites de Consistencia y Granulometría | 174 |
| Tabla 41 Resumen de resultados B2 Cumbres Límites de Consistencia y Granulometría | 178 |
| Tabla 42 Resumen de resultados B3 Maqlub Límites de Consistencia y Granulometría | 181 |
| Tabla 43 Resumen de resultados B4 Moya Límites de Consistencia y Granulometría | 185 |
| Tabla 44 Resumen de resultados B5 Cerritos Límites de Consistencia y Granulometría | 188 |

**LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS Y UNIDADES**

| | |
|--------------------------------|---|
| AFm | Hemi y Monocarboaluminatos. |
| AFt | Etringita. |
| Al ₂ O ₃ | Óxido de Aluminio. |
| ASTM | American Society for Testing and Materials. |
| B1Z | Banco de Suelos Zayre. |
| B2C | Banco de Suelos Cumbres. |
| B3M | Banco de Suelos Maqlub. |
| B4M | Banco de Suelos Moya. |
| B5C | Banco de Suelos Cerritos. |
| BTC | Bloques de Tierra Comprimida. |
| C ₂ S | Belita (Silicato Dicálcico). |
| C ₃ S | Alita (Silicato Tricálcico). |
| CAO | Contenido de Agua Óptimo. |
| CASH | Silicoaluminato de Calcio Hidratado. |
| CBR | California Bearing Ratio (Relación de Soporte de California). |
| CE | Conductividad Eléctrica. |
| CH | Arcilla inorgánica de alta plasticidad. |



| | |
|-----------------|--|
| CL | Arcilla inorgánica de baja plasticidad. |
| CO ₂ | Dióxido de Carbono. |
| CSH | Silicato de Calcio Hidratado. |
| DRX | Difracción de Rayos X. |
| EDS | Espectroscopía de Dispersión de Energía. |
| ELR | Índice de Carga Ambiental (Environmental Loading Ratio). |
| ESI | Índice de Sustentabilidad Ambiental (Emergy Sustainability Index). |
| EYR | Índice de Producción de Emergy (Emergy Yield Ratio). |
| FRX | Fluorescencia de Rayos X. |
| FTIR | Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier. |
| F | Flujos de combustibles fósiles. |
| GC | Grava con arcilla. |
| GM | Grava con limo. |
| GP | Grava mal graduada. |
| GW | Grava bien graduada. |
| GJ | Gigajoule. |
| g | Gramo. |



| | |
|---------------------------------|---|
| I | Flujos importados. |
| KOH | Hidróxido de Potasio. |
| kN | Kilonewton. |
| kWh | Kilowatt-hora. |
| LI | Índice de Plasticidad. |
| LL | Límite Líquido. |
| LP | Límite Plástico |
| MH | Limo inorgánico de alta plasticidad. |
| ML | Limo inorgánico de baja plasticidad. |
| MJ | Megajoule. |
| m ³ | Metro cúbico. |
| mS/cm | Milisiemens por centímetro (unidad de conductividad eléctrica). |
| M | Recursos materiales. |
| MPa | Megapascal. |
| N | Recursos no renovables. |
| NASH | Silicoaluminato de Sodio Hidratado. |
| Na ₂ SO ₄ | Sulfato de Sodio. |
| NMX | Norma Mexicana. |



| | |
|------------------|---|
| NTC | Norma Técnica Colombiana. |
| OH | Limo o arcilla orgánicos de alta plasticidad. |
| OL | Limo o arcilla orgánicos de baja plasticidad. |
| ONNCCE | Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. |
| PA | Puzolana Activada. |
| pH | Potencial de Hidrógeno. |
| PT | Suelos orgánicos altamente compresibles (turba). |
| R | Recursos renovables. |
| RC | Resistencia a Compresión. |
| S | Servicios. |
| SC | Arena con arcilla. |
| seJ | Solar Energy Joules (Joules eMergéticos Solares). |
| SEM | Microscopía Electrónica de Barrido (Scanning Electron Microscopy). |
| SiO ₂ | Dióxido de Silicio. |
| SM | Arena con limo. |
| SP | Arena mal graduada. |
| SUCS | Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. |



| | |
|---------|--|
| SW | Arena bien graduada. |
| TGA-DTG | Análisis Termogravimétrico y Derivado. |
| UNE | acrónimo de Una Norma Española. |
| Y | Producto energético útil (Yield). |
| °C | Grados Celsius. |
| % | Porcentaje. |

RESUMEN

En las últimas décadas, la industria de la construcción ha generado un impacto ambiental significativo debido al alto consumo de recursos naturales y la emisión de contaminantes. Esta investigación explora, la aplicación de suelos estabilizados con puzolanas naturales activadas alcalinamente como una alternativa innovadora y sustentable para la construcción con tierra. El objetivo principal fue evaluar la viabilidad técnica, ambiental y científica de estos materiales en comparación con sistemas tradicionales como la estabilización con cal.

Se analizaron cinco bancos de suelo ubicados en el noroeste de Nuevo León. Mediante una caracterización física, química y mineralógica, se seleccionaron los bancos B1Z y B3M por sus propiedades clave. Los resultados mostraron que los suelos estabilizados con PA alcanzaron mayores valores de CE (>6.0 mS/cm con 2.5% PA) y RC (30 kg/cm² a 7 días) en comparación con los estabilizados con cal (3.0 mS/cm con 10% de cal y 20 kg/cm² de RC).

Desde una perspectiva ambiental, el índice de sustentabilidad (ESI) indicó que los suelos estabilizados con PA representan una alternativa con menor impacto ambiental en comparación con los estabilizados con cal.

Esta tesis doctoral constituye una contribución significativa al campo de la estabilización de suelos, y los materiales cementantes alternativos, proporcionando una base científica para futuras aplicaciones y promoviendo soluciones con impacto positivo en la sostenibilidad ambiental y la eficiencia de recursos en la construcción contemporánea.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, dentro de la industria de la construcción existe una creciente preocupación por temas sobre el medio ambiente tales como, la contaminación del agua y la degradación del suelo, pero sobre todo por la explotación excesiva de los recursos naturales y el aumento de las emisiones contaminantes que implica la producción y el uso creciente del cemento, responsable del 8 al 10% del total de emisiones de CO₂ a nivel mundial [1], así como de otros materiales de construcción. Esta dinámica de desarrollo en los materiales de construcción incrementa la distancia entre la obtención de materias primas y la ubicación de su elaboración para su puesta en la obra.

Todo esto, conduce a la necesidad de buscar materiales alternativos que contribuyan a frenar los efectos sobre el medio ambiente y mitigar las consecuencias, que el sector de la construcción provocará a las generaciones futuras, por lo que, el estudio y la aplicación de sistemas energéticamente más eficientes o fuentes alternativas de materiales de construcción son demandas para evaluar en un plazo inmediato. Es aquí donde sistemas de construcción de bajo consumo energético, como la construcción con tierra estabilizada con puzolanas naturales activadas alcalinamente, se podría mostrar como una de las elecciones más apropiadas.

La construcción con tierra a través de la historia se ha presentado como uno de los procesos más utilizados por el hombre en la ejecución de edificaciones, debido a su abundancia y fácil manipulación [2]. El empleo de tierra cruda como sistema constructivo presenta grandes ventajas, entre las cuales se encuentra un bajo impacto ambiental (al no adicionar cemento en la mayoría de la matriz ligante) y una reducción del consumo energético (al requerir, por ejemplo, los Bloques de Tierra Comprimida (BTC)

aproximadamente el 1% de la energía necesaria para fabricar y procesar el mismo volumen de concreto). Además, al utilizar solo tierra no se requiere un gran transporte de materiales, ya que la extracción puede ser in situ, o una cocción a altas temperaturas que van desde los 900°C hasta los 1500°C, en el caso del uso de cemento como material estabilizante. La tierra es un material inerte, que no se quema, ni es susceptible de recibir ataques de insectos, además, que es por naturaleza transpirable y por su fácil acceso se puede considerar un recurso económico y trabajable.

En relación con lo anterior, la técnica de bloques de tierra comprimida (BTC) presenta una alternativa como material de construcción que cumple el desempeño normativo con un bajo impacto ambiental (al consumir menos recursos y requiriendo un menor trabajo energético) que contribuye a reducir las emisiones de carbono, además que conserva propiedades en las edificaciones, como la regulación de humedad y acumulación de calor, de modo que absorben la humedad cuando el ambiente es húmedo y la liberan cuando el aire es seco. Sin embargo, la técnica de los bloques de tierra comprimida presenta algunas limitaciones importantes que requieren atención, como obtener una tierra con plasticidad y cohesión adecuadas para su producción, con la finalidad de lograr un buen desempeño (al aumentar su resistencia a la compresión y su oposición a la deformación si su uso fuese en terracerías), además de un análisis de suelo, que incluya parámetros como los límites de consistencia o límites de Atterberg para corroborar lo anterior, además un vasto conocimiento de los procesos de producción y de uso.

Los BTC y otros materiales base tierra, en comparación con los ladrillos y los bloques de concreto convencionales, presentan muy bajas prestaciones en cuanto a su

desempeño mecánico, debido a la poca información e interés de edificar viviendas utilizando esta técnica, por lo que generalmente no es posible tener construcciones con claros o luces muy grandes o bien edificios altos, de manera que es necesario mejorar las propiedades y el desempeño de las mezclas con tierra que se utilizan para su producción. De esta forma es necesario desarrollar una buena dosificación y combinación de materias primas que resulten en un aumento en su resistencia.

Por lo anterior, se propone la adición, en la dosificación, de puzolanas naturales activadas alcalinamente, como una alternativa de un estabilizante natural para mejorar la durabilidad y el desempeño mecánico de los suelos estabilizados empleados en la técnica de bloques de tierra comprimida, debido a que las puzolanas naturales son una gran fuente de sílice y alúmina reactivas, es decir, que cuentan con características microestructurales con alto potencial de un material aglutinante, obtenidos en un medio alcalino. Su origen es generalmente volcánico, y su término (puzolana) se refiere a la ciudad de Pozzuoli en Italia, donde fue descubierto por primera vez por los romanos, quienes observaron que las puzolanas naturales tienen propiedades cementantes y fue así como comenzaron a utilizarlas como componentes de construcción, por sus propiedades cementicias conocidas como propiedades puzolánicas que dependen de la cantidad de SiO y Al_2O_3 reactivos [3–6]. Por ello, presentan un elevado potencial para ser utilizadas como materiales de construcción sostenible, y que al evitar estabilizar un suelo solo con cal y cemento, supondrá una construcción sustentable sin adiciones artificiales significativas e impulsando su uso en la industria de la construcción mejorando las propiedades mecánicas, la durabilidad, la eficiencia y la seguridad del suelo estabilizado.

En este estudio se realizaron sondeos en distintos bancos de materiales utilizados en terracerías dentro de la región noroeste del estado de Nuevo León y qué a partir de su caracterización física, química y mineralógica se determinó, cuál sería el más apropiado para estabilizar mediante la adición de puzolanas naturales activadas alcalinamente, para implementar su uso, no solo como material constructivo en técnicas de construcción con tierra como los BTC, de manera que sean más durables y mecánicamente superiores que los suelos con estabilizantes tradicionales, tomando como base comparativa la energía necesaria para fabricarlos, sino también que puedan ser usados en terracerías o como parte de la estructura en la construcción de pavimentos, por lo que se compararon distintas dosificaciones del estabilizante convencional como la cal y también distintos porcentajes de puzolana activada (PA), y se investigaron las propiedades físicas, de resistencia y durabilidad de estos suelos estabilizados con puzolanas naturales activadas alcalinamente, además de sus propiedades químicas y mineralógicas antes y después de su estabilización y posterior a ello un análisis eMergético para determinar la carga ambiental y el índice de sustentabilidad ambiental de este estabilizante alternativo.

1.1 Planteamiento del problema

Una de las principales desventajas cuando se desarrolla construcción con tierra es que, actualmente en México, es una técnica que generalmente se practica de manera artesanal [7], puesto que son pocas las normas oficiales que regulan su uso e implementación, de manera que la difusión de éstas es mínima en el mercado de la construcción nacional. Esto lleva a considerar que, como técnica de construcción, bien puede ser modificada o alterada sin ningún lineamiento normativo riguroso y eso provoca

la desconfianza en el uso de ésta como material, aunado a que existen pocos estudios de contenido regional sobre aspectos físicos del material, como es el caso de la capacidad térmica del material, la durabilidad, los procedimientos de fabricación, etc., esto especialmente para la técnica de Bloques de Tierra Comprimida (BTC) por lo que, se vuelve oportuno el estudio de todas estas características, junto con comportamientos que permitan hacer una comparación con materiales convencionales y alternativos además de, corroborar su resistencia mecánica a la compresión, a la flexión y al corte, resistencia en húmedo, su estabilidad física, mecánica y química, su comportamiento térmico, su durabilidad, eficiencia energética y su grado de sustentabilidad, entre otras propiedades como su capacidad higroscópica, la adherencia de morteros de junta y de aplanados que son de importancia para la aplicación.

Este problema se agrava por las restricciones impuestas por los organismos de vivienda en México, como el INFONAVIT, que establecen criterios mínimos de habitabilidad basados en estándares tradicionales, lo que obliga a emplear materiales con alto impacto ambiental y elevados costos de producción. En consecuencia, muchas viviendas no cumplen con las condiciones óptimas de confort térmico, eficiencia energética y sostenibilidad, lo que incrementa los costos de mantenimiento y el consumo de energía para climatización, generando además un impacto ambiental significativo.

Ante esta problemática, la posibilidad de usar tierra como material constructivo en los elementos principales de una casa de bloques comprimidos presenta una alternativa para el mejoramiento de las condiciones de habitabilidad [8]. Entre sus ventajas se encuentran una fácil producción, una rápida ejecución, un bajo consumo energético, y un

alto confort. Esto insinúa que el sistema constructivo con tierra puede beneficiar a las personas que no cuentan con una vivienda adecuada a sus necesidades otorgándoles una opción económica, segura, durable y con un enfoque sustentable. Siendo además estabilizada con un material natural como las puzolanas de origen volcánico, que, aunque por sí mismas no muestran un comportamiento hidráulico, cuando se encuentran en presencia de agua y de un activador alcalino adecuado muestran un comportamiento hidráulico para producir un material cementante.

En este sentido, los BTC y la construcción con tierra, en general, se vuelven ideales para un contexto de vivienda social al que pudiera solucionar las problemáticas de aspecto, al observar la necesidad de una vivienda no solo digna, sino que también demuestre resolver las necesidades constructivas de forma amigable con el medio ambiente con el uso de estabilizantes de origen volcánico como las puzolanas naturales y la activación alcalina de éstas, aprovechando los recursos con los que se cuentan en la zona con materiales sustentables o incluso llegando a procesos autoconstructivos.

En relación a que existen muy pocas investigaciones nacionales que indiquen un método que ayude a la elección objetiva de un estabilizante natural o químico es necesario plantear una metodología apegada a las normativas de construcción vigentes tal como la norma NMX-C-508-ONNCCE Industria de la Construcción - Bloques de Tierra Comprimida Estabilizados con Cal - Especificaciones y Métodos de Ensayo [9], que tiene por objeto establecer las especificaciones y métodos de ensayo de los Bloques de Tierra Comprimida (BTC) estabilizados con cal, usados en muros de carga, divisorios (pudiendo o no ser aparentes) y techos en bóvedas, así como los métodos de ensayo adecuados a las

formas prismáticas con congruencia entre ellos. De este modo, se puede establecer que la adición de puzolanas naturales activadas alcalinamente para la estabilización de suelos usados para distintas técnicas de construcción con tierra representará un significativo incremento en la resistencia a la compresión, la impermeabilidad, la durabilidad, el impacto ambiental y la economía. Esto permitirá dar un paso para que la construcción con tierra en específico para estabilizar el suelo con puzolanas naturales activadas alcalinamente, alcance mayor notoriedad y apoye al desarrollo y la revaloración de esta técnica constructiva aportando así una importante mejora en las características de los materiales, en beneficio del medio ambiente.

Además, con la estabilización de estos suelos cabe la posibilidad de que sean utilizados para la construcción de pavimentos, como parte de su estructura, mejorando las propiedades y la durabilidad de estas vías, que, de acuerdo con la International Energy Agency [10], aproximadamente el 25% de las emisiones globales de CO₂ corresponden a la industria del transporte, requiriendo 7×10^6 MJ de energía para construir apenas 1 km de carretera asfáltica estándar de dos carriles, siendo la cal el estabilizador más habitual para las capas de soporte de estos pavimentos y responsable del 2-5% de estas emisiones [11,12] sustituyendo al cemento no solo por la alta cantidad de energía requerida para producir 1 tonelada de cemento (alrededor de 4 GJ) sino también el uso excesivo de agua, siendo cerca de 100 L/m³ por tonelada, cuando se produce concreto llegando aproximadamente a 1 billón de litros cada año [13].

Por lo anterior, se hace necesario evaluar los suelos desde su composición química y su estructura de partículas, para entender y comprender cómo están ordenadas y el

espacio que existe entre ellas, así como el tamaño, la forma y el arreglo, además de su desempeño como elemento en la industria de la construcción como la resistencia a compresión y la flexión tanto en pilas como en muretes para la edificación de distintas estructuras logrando un mayor confort, mayor durabilidad y garantizando la seguridad y calidad de los mismos.

1.2 Justificación

La utilización de adiciones minerales, generalmente artificiales como reemplazo parcial o total del cemento Portland ha sido ampliamente estudiado, llegando a ser una práctica habitual para mejorar, modificar y estabilizar suelos en distintos ámbitos para la industria de la construcción; sin embargo, utilizar puzolanas naturales como agente estabilizador en suelos para técnicas de construcción con tierra como los Bloques de Tierra Comprimida (BTC) y su posible aplicación en terracerías para pavimentos no ha sido hasta el momento debidamente estudiado, considerando su activación mediante sulfatos, es debido a esto que, adicionar puzolanas naturales activadas alcalinamente con el fin de estabilizar el suelo base para fabricar BTC y terracerías para la construcción de pavimentos cobra gran importancia, debido a que existe la posibilidad de desarrollar una dosificación que utilice estas adiciones minerales como estabilizante, reduciendo así el impacto ambiental asociado con la fabricación de materiales semejantes. Por lo anterior, y de acuerdo con Fábregas, Maña y Vázquez [14] y sus criterios de selección para un material alternativo medioambientalmente correcto se puede presentar a los BTC como un material alternativo con alto potencial al cumplir con los criterios de selección, y que por otra parte con el uso de puzolanas naturales como elemento base de estabilización cumplirá aún más con tales criterios como son: -Ahorro energético: Atribuido a su proceso

de fabricación en nulos gastos de transporte (la tierra se obtiene in situ). -Valoración de residuos: Debido a la posibilidad de reciclar el BTC una vez concluido su ciclo de vida. -Tecnología Limpia: Provisto al proceso de fabricación de BTC (al no producir ningún tipo de contaminante). -Ausencia de toxicidad: Otorgado al ciclo de vida de los BTC (que durante este no se desprende ningún producto toxico y ninguna radiación). -Durabilidad: Dotado de la propia tierra (al no recibir el ataque de microorganismos).

Es así como estabilizar suelos con puzolanas naturales activadas alcalinamente para edificación con tierra se convierte en un procedimiento alternativo de construcción y de autoconstrucción, que además brinda una alternativa al déficit habitacional, y que de cierta manera ofrece popularizar el uso de materiales alternativos de construcción de ingeniería tradicionales como la construcción con tierra, pero pudiendo cumplir y mejorar los requerimientos de desempeños actuales que solicitan las normas nacionales y extranjeras de construcción, incorporando materiales sostenibles en su proceso que terminan utilizando menos recursos y con ello ayudando a mitigar residuos y emisiones en la industria de la construcción.

1.3 Hipótesis

Distintos suelos, en función de su composición física, química y mineralógica, estabilizados mediante puzolanas naturales activadas alcalinamente, experimentarán un incremento en su desempeño mecánico (medido a través de parámetros como la resistencia a la compresión y la oposición a la deformación) y durabilidad (mediante ensayos de goteo y abrasión hídrica), lo que permitirá su uso en técnicas de construcción con tierra (como bloques de tierra comprimida) y en terracerías para la construcción de pavimentos.

Finalmente, estos suelos estabilizados con puzolanas naturales activadas alcalinamente tendrán una carga ambiental reducida en comparación con los materiales convencionales, contribuyendo en la adopción de métodos de construcción más sostenibles en la industria.

1.4 Objetivo general

Desarrollar y evaluar suelos estabilizados mediante la adición de puzolanas naturales activadas alcalinamente, analizando su desempeño mecánico, durabilidad y su memoria energética en comparación con estabilizantes convencionales como la cal. Esto permitirá su aplicación en técnicas de construcción con tierra y terracerías para la construcción de pavimentos, promoviendo una alternativa de estabilizante sostenible que reduzca el impacto ambiental y contribuya a la conservación de los recursos naturales.

1.5 Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de los materiales propuestos (bancos de suelo y puzolana natural), por medio de análisis granulométrico, límites de Atterberg y densidad, además del uso de técnicas de caracterización como Fluorescencia de Rayos X (FRX) y Difracción de Rayos X (DRX), con el fin de evaluar su idoneidad y viabilidad técnica como estabilizante en construcción.
- Seleccionar los suelos más adecuados a estabilizar mediante la comparación de sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas, además de la Relación de humedad y densidad (Proctor Estándar) y la Relación de Soporte California (CBR), identificando sus ventajas y limitaciones en términos de su obtención y aplicabilidad en técnicas de construcción con tierra y terracerías.

- Evaluar la dosificación óptima de suelo, cal y puzolana natural activada alcalinamente, así como la cantidad de agua y las condiciones de curado, para identificar las combinaciones más eficientes en función de su pH y conductividad eléctrica (CE).
- Determinar y comparar las propiedades mecánicas de resistencia a compresión, oposición a la deformación y durabilidad de los suelos estabilizados únicamente con cal, frente a aquellos que incorporan puzolanas naturales activadas alcalinamente, para determinar si esto ofrece un desempeño superior en términos de estabilidad.
- Analizar y comparar las estrategias de estabilización de suelos mediante el uso de cal contra el uso de puzolanas naturales activadas alcalinamente, a través del análisis de la eMergía (memoria eMergética), con el fin de establecer qué estrategia ofrece un menor impacto ambiental y mayor eficiencia energética.

CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Marco teórico

En este apartado, como parte fundamental de la revisión bibliográfica, se presentan las bases conceptuales y teóricas relacionadas con la construcción con tierra. Se analiza el origen y la evolución de estas técnicas, destacando sus ventajas y desventajas, y su relevancia actual en un contexto de sostenibilidad. Además, se discuten las distintas técnicas de estabilización de suelos empleadas, como los estabilizantes naturales, y cómo han evolucionado para mejorar el desempeño y la durabilidad de las construcciones. En particular, esta investigación propone el uso de puzolanas naturales activadas alcalinamente como estabilizantes de suelos, buscando una alternativa menos destructiva para el medio ambiente. Se incluye, además, análisis del método utilizado para evaluar el impacto ambiental de esta propuesta.

2.1.1 Construcción con tierra

Los principales impactos ambientales de los materiales utilizados en la industria de la construcción incluyen un alto consumo de energía, generación de residuos, efecto invernadero, destrucción de la capa de ozono y otros factores de contaminación ambiental [15,16]. Por lo que, es necesaria la búsqueda de nuevas materias primas o construcciones sustentables. El propósito de la aplicación de estándares de construcción sustentable es construir con materiales industrializados cada vez en cantidades más reducidas, para evitar en la medida de lo posible la generación de residuos al final de su ciclo de vida.

Con relación a lo anterior, se ha visto en aumento el número de investigadores dedicados a la construcción sustentable que sea congruente con el medio ambiente, en donde la sustentabilidad radica en adaptar el entorno humano a un factor limitante, donde

la capacidad del entorno pueda soportar la presión humana de manera que los recursos naturales no se degraden irreversiblemente [17].

2.1.1.1 Ventajas y desventajas de la construcción con tierra

Hasta donde se tiene conocimiento, la tierra es uno de los materiales de construcción más antiguos utilizados por la humanidad y actualmente representa una solución a la demanda de construcciones de bajo costo [18]. Además de ser una alternativa ambientalmente sostenible, que también evita el uso de materiales con alto contenido de carbono, y un intensivo consumo de energía. Sin embargo, la construcción con tierra presenta algunas propiedades indeseables como, afinidad con el agua, comportamiento frágil, así como también baja resistencia a la compresión y a la tensión, en comparación con otros materiales de construcción convencionales [19–22]. Estas deficiencias pueden superarse reforzando la mezcla de suelo con aditivos o estabilizadores.

2.1.2 Técnicas de construcción con tierra

Existen diferentes técnicas tradicionales y contemporáneas de construcción con tierra. Entre las más comunes se encuentran: el adobe (ladrillo de tierra cruda seca) que se trata de un ladrillo que se fabrica por medio del moldeado de una mezcla plástica que no requiere presión alguna, el material es un barro denso y manejable que al ser mezclado con paja y secado al sol se rigidiza notablemente; la tierra apisonada (muro monolítico de tierra comprimida) también conocida como “Tapial”, que consiste en crear una mezcla de tierra húmeda la cual es compactada a golpes por medio de un pisón utilizando un encofrado de madera para crear un muro; la tierra entramada (estructura vegetal y relleno de tierra fibrosa) considerada como una técnica mixta generalmente conocida como

“Bajareque” la cual se refiere a entramados o tejidos de ramas delgadas recubiertos con barro; y la tierra amasada o cob (muro monolítico de tierra apilada mezclada con fibras) es muy parecido al adobe y al tapial y frecuentemente suele confundirse con estos, pero a diferencia de ellos, es un apilado de bolas de tierra compuestas por medio de una masa plástica que llega a formar un muro monolítico. En estos sistemas constructivos naturales, la mayor parte de la energía relacionada con la producción proviene del trabajo humano y del sol, pues el método de secado se realiza al aire libre y al sol, sin la necesidad de utilizar un secado en horno.

2.1.2.1 BTC una técnica de construcción con tierra

La mayoría de las técnicas ancestrales de construcción con tierra se han mantenido con diminutos cambios desde la antigüedad hasta hoy en día, aunque con algunas aportaciones modernas [23]. Tal es el caso de los Bloques de Tierra Comprimida (BTC), que son bloques fabricados a base de una mezcla de “tierra cruda” (ya que no pasa por ningún proceso de cocción ni la quema de recursos no renovables) que según Gallipoli y colaboradores [24] es un material de construcción que consiste en la densificación mecánica de un suelo húmedo compactado generalmente arcilla - arena, con la posible adición de refuerzo de agentes como fibras o aglutinantes químicos que a diferencia de la "tierra cocida" (por ejemplo, ladrillos de mampostería convencionales), la mezcla de suelo y el agua se someten a la menor cantidad posible de transformaciones y se utilizan en una forma muy cercana a su estado natural, la cuál es comprimida bajo una fuerte presión (hasta 100 kg/cm^2), generalmente con un 82.75% de tierra, un 6.20% de arena y un 11.05% de algún cementante como estabilizador [25].

2.1.3 Estabilizantes de suelo utilizados en la construcción con tierra

Para Burt, Minke y Willimas-Ellis [20,21] un estabilizante es un material que, permitirá mejorar las características físicas del suelo, ya sea aumentando la resistencia a la compresión, a la tracción, o bien reduciendo las fisuras por la retracción de la arcilla. Entre los estabilizantes de origen mineral para arcillas, se encuentran el cemento y la cal, y el menos utilizado, el yeso, aunque puede incluirse debido a que es un sulfato de calcio, que mejora el fraguado de la mezcla.

El cemento actúa como estabilizador, pero, mientras mayor sea el contenido de arcilla, mayor la cantidad de cemento para lograr el efecto adecuado de estabilización. A su vez, los iones de la cal se intercambian con los de la arcilla y en presencia de humedad se forman fuertes cadenas estabilizadoras en la mezcla. El yeso, por su parte, es utilizado como estabilizador de suelos con bajo contenido de arcilla. Para el caso de suelos con 55 a 65 % de arena en su composición, se recomienda estabilizarlos con cal y para aquellos que en su composición posean un porcentaje mayor que el 65 % se recomienda estabilizarlos [26] principalmente con cemento, cal y yeso para alcanzar o desarrollar algunas características como mayor resistencia y durabilidad, logrado con una menor fuerza de compactación.

El uso de aglutinantes minerales (a veces cal, pero principalmente cemento) para la estabilización química de materiales térreos está ganando importancia, puesto que existen muchas razones para esta estabilidad como una mayor resistencia al agua y la mejora de las propiedades mecánicas. Sin embargo, estas estabilizaciones de aglutinantes inorgánicos no están absueltas de consecuencias, principalmente sobre la sustentabilidad,

pues esencialmente se encuentran las emisiones de CO₂ en las que el uso del cemento y la cal lo aumentan, de acuerdo con Van Damme y Houben [27].

Por lo anterior, Van Damme y Houben [27] evaluaron el impacto ambiental de la adición de Cemento Portland Ordinario (CPO) en materiales con tierra, en particular por medio del uso del índice de intensidad del ligante o índice de intensidad de carbono que fue introducido por Damineli et al. [28]. Además, concluyeron que en la mayoría de los casos el utilizar cemento Portland compuesto no merecía el esfuerzo, ni en términos mecánicos y mucho menos en términos medioambientales. Los resultados experimentales mostraron que el uso de CPO solo aporta una breve mejora en cuanto a sus propiedades mecánicas, pero a un costo ambiental demasiado elevado. Además, que el uso de aglutinantes minerales como estabilizantes limitan la posibilidad de reciclado en los materiales de tierra [1,27–30].

Aunque los BTC estabilizados con cemento y cal posean muy buenas prestaciones es necesario considerar que su implementación implica un alto costo económico y que su fabricación requiere significativos procesos de transformación térmica superando los 1400°C liberando CO₂ a la atmosfera, además de muchos otros gases tóxicos y la gran cantidad de energía requerida. Por todo esto, es necesario el estudio sobre la utilización de estabilizantes no cementicios, que posean características más económicas y medioambientalmente menos perjudiciales que los estabilizantes más comúnmente utilizados, como la cal que se encuentra normado su uso en México para BTC por la NMX-C-508 [9].

2.1.4 Puzolanas naturales como estabilizante en suelos

A todas las sustancias inorgánicas naturales o artificiales que se endurecen en presencia de agua cuando se mezclan con hidróxido de calcio (cal) o con materiales que puedan liberar hidróxido de calcio durante su proceso de hidratación se les conoce como “adiciones minerales” [31]. De acuerdo con la Norma ASTM-C-618, es el caso de las puzolanas que las define como materiales silíceo o aluminio-silíceo que por sí solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se han dividido finamente y en presencia de agua e hidróxido de calcio (cal) reaccionan químicamente a temperatura ambiente para formar compuestos C-S-H (silicatos de calcio hidratados) y C-A-H (hidratos de aluminato de calcio), los cuales poseen propiedades cementantes [31,32]. Estas puzolanas pueden ser de origen volcánico que incluyen materiales formados por la extinción del magma fundido proyectado a la atmósfera sobre erupciones volcánicas, o de origen sedimentario que incluyen arcillas y tierras de diatomeas. Ambas por lo general, cuentan con una estructura silícea amorfa que puede contener fases cristalinas de hasta el 30%, y composiciones químicas reactivas de sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y óxido de hierro (Fe_2O_3) que sumados requieren un valor mínimo del 70% en masa [33]. De manera que se estudiarán debidamente para la implementación de estabilizante en los bloques de tierra comprimida para la cual se activarán alcalinamente.

Con relación a lo anterior, la adición de puzolanas naturales activadas alcalinamente como estabilizante en bloques de tierra comprimida le dan el potencial de un material alternativo, que pasarían a formar parte de lo que en la actualidad se conoce como “Construcción Sustentable”, pero estos se enfocan principalmente en la utilización de materiales no convencionales o alternativos y con ello de la mano la creación de nuevas

técnicas y métodos de construcción a partir de la utilización de este tipo de materiales o productos, cuyas características los vuelven ventajosos en comparación con los materiales convencionales al momento de elegirlos, ya sea por el hecho de ser reciclables o biodegradables, además de que no requieren mucha energía en su producción. Al mismo tiempo poseen características constructivas aprovechables por resultar más económicos y porque no requieren mano de obra especializada para su implementación. De acuerdo con Fábregas et al [14] y su propuesta de criterios de selección, el uso de puzolanas naturales como elemento base de estabilización de suelos, presenta a esta técnica de construcción como un recurso alternativo medioambientalmente correcto, al cumplir con los criterios que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 Criterios aplicables a la selección de materiales de construcción medioambientalmente correctos. (Fábregas, et. al., 1998).

| Criterios | Justificación |
|----------------------------------|---|
| 1. Recursos renovables | Los materiales elaborados con materias primas y energías renovables o muy abundantes son preferibles, antes que otros que utilizan fuentes convencionales o escasas (por ej.: combustibles fósiles, minerales escasos, etc.) debido al carácter preservante y efecto biodegradable de sus fuentes materiales. |
| 2. Ahorro energético | El balance energético del material debe demostrar ser el producto con menor coste energético a lo largo de su ciclo de vida, principalmente cuando se compara con otro, bajo los mismos criterios. |
| 3. Valoración de residuos | El uso de materiales elaborados con residuos, reutilización o reciclaje de subproductos de la construcción, frente a otros materiales con fuentes de materias primas convencionales deben ser potenciados. |
| 4. Industrialización | Los productos estándar montados industrialmente que disponen de un balance en su ciclo de vida racional, y principalmente, desde el punto de vista económico, son más favorables. |

| | |
|-----------------------------|--|
| 5. Tecnología limpia | Todas las fuentes de materias primas y energías empleadas en la producción del material, tal como, la eficiencia del proceso productivo (extracción, transformación y acabados) deben asumir el carácter no contaminante. |
| 6. Toxicidad | La ausencia de efectos alérgicos, emisiones tóxicas, anomalías electromagnéticas y minimización de radioactividad natural constituyen un criterio básico para la selección del material. |
| 7. Durabilidad | Todas las informaciones acerca del valor funcional, durabilidad y bases de mantenimiento para que el producto resista adecuadamente bajo las condiciones de uso, durante toda su vida útil, son valores fundamentales como criterio selectivo. |

De la tabla 1 se analizan los BTC a los criterios aplicables de selección de materiales de construcción medioambientalmente correctos en los cuales se aprecia:

- Recursos renovables: Con la adición de puzolanas naturales activadas alcalinamente como elemento base de la estabilización de los bloques de tierra comprimida.
- Ahorro energético: Atribuido a su proceso de fabricación en nulos gastos de transporte (la tierra se obtiene in situ).
- Valoración de residuos: Debido a la posibilidad de reciclar el BTC una vez concluido su ciclo de vida.
- Industrialización: La posibilidad de fabricar BTC con el fin de comercializarlos por región.
- Tecnología Limpia: Asociada al proceso de fabricación de BTC (al no producir ningún tipo de contaminante).

- Ausencia de toxicidad: Otorgada al ciclo de vida de los BTC (que durante este no se desprende ningún producto tóxico y ninguna radiación).
- Durabilidad: Derivada de la propia tierra (al no recibir el ataque de microorganismos).

Es así como los suelos estabilizados con puzolanas naturales activadas alcalinamente son un material alternativo de la construcción y de la autoconstrucción que además brindan una alternativa al déficit habitacional.

2.1.5 Método para la valoración ambiental

2.1.5.1 *eMergía*

La palabra eMergía (escrita con M), se deriva de la denominación de análisis eMergético, siendo la traducción de eMergy que designa al concepto de “Energy Memory” (Memoria Energética). La eMergía se define como la disponibilidad de energía (exergía) disponible. Esto quiere decir, la energía (de un determinado tipo) usada en las transformaciones directa e indirectamente para generar un determinado producto o servicio. Por ejemplo, la luz del sol, los combustibles, la electricidad y los servicios humanos se pueden poner sobre una base común a manera de expresar todos estos en emjoules de la energía solar requerida para poder producir cada uno. Donde su valor es una unidad de eMergía solar que se expresa en emjoules solares (seJ abreviado).

Cada una de estas formas de energía se produce a través de procesos de transformación en la naturaleza, y tiene una determinada capacidad para realizar un trabajo, tanto en sistemas ecológicos como en sistemas humanos. El reconocimiento de esas diferencias en calidad es un concepto clave en la metodología de la eMergía [34].

El análisis eMergético se encuentra fundamentado en la Teoría General de Sistemas que fueron establecidas a partir del trabajo de Von Bertalanffy, 1969 [35], y en las leyes energéticas de Lotka, 1922 [36], las cuales suponen uno de los primeros intentos de integrar sistemas ecológicos y económicos en términos cuantitativos, empleando la energía como un lenguaje común, sujeta a las Leyes de la Termodinámica, así como en la Ecología de Sistemas y en la Energética de Ecosistemas que fue desarrollada por el investigador H.T. Odum y su hermano E. P. [37,38] quienes admitieron una combinación de las dos perspectivas mencionadas. Donde la eMergía mide la convergencia global de energía solar necesaria para obtener un determinado producto, o para regenerar tal producto una vez consumido, o bien, mantener un determinado sistema, siendo su unidad de medida el Joule eMergético Solar (seJ).

Con relación a lo anterior y a los primeros intentos por definir a la eMergía, Odum usó el concepto jerarquía de la energía, el cual se encuentra representado en la Figura 1 como un medio para explicar el trabajo de la naturaleza y la sociedad que resulta en transformaciones de energía. Cuando se ven en su totalidad, los sistemas de la naturaleza y la sociedad están interconectados en redes de flujo de energía. Su concepto se basa en que todas las transformaciones de energía de la geo-biosfera podían organizarse en una serie ordenada para formar una jerarquía de la energía con muchos julios de luz solar necesarios para hacer un julio de materia orgánica, muchos julios de materia orgánica para producir un julio de combustible, y varios julios de combustible para producir un julio de energía eléctrica, y así sucesivamente.

Esto indica que 1 Joule de energía solar, 1 Joule de carbón o bien 1 Joule de electricidad, aunque sí representan la misma cantidad, no representan la misma calidad de energía, esto en el sentido del potencial que tienen para actuar sobre el sistema, y en la necesidad que tiene el sistema de aportar mayores o menores cantidades de energía menos concentradas para generar cada una de ellas [39].

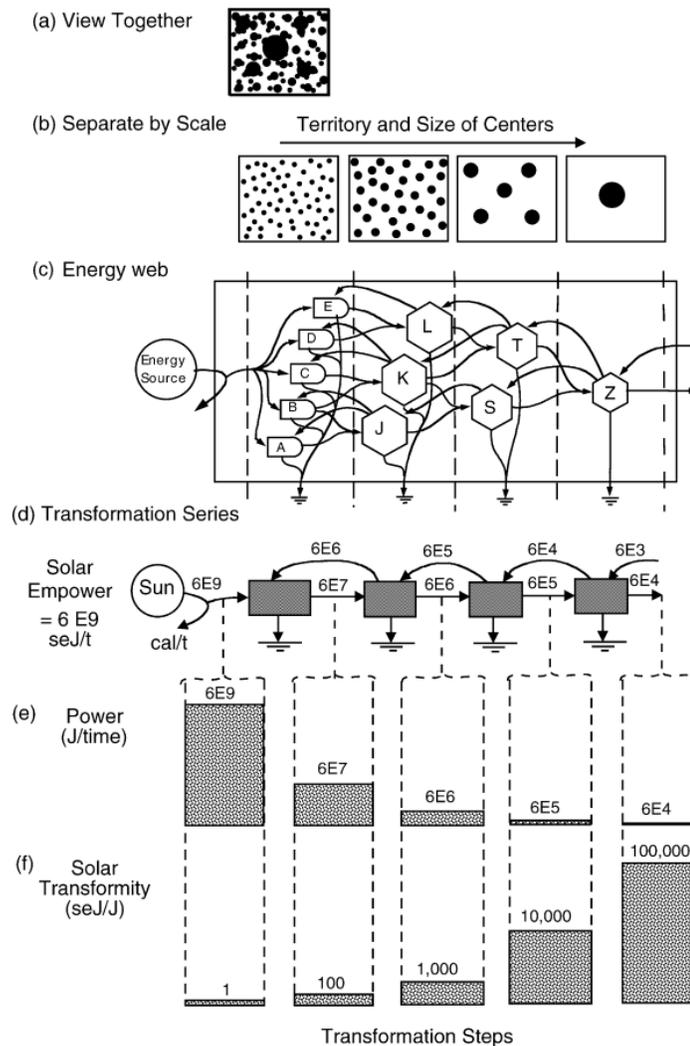
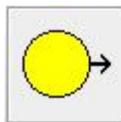


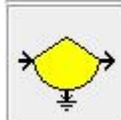
Figura 1 Conceptos de jerarquía de transformación de energía. (a) Todas las unidades se ven juntas; (b) unidades separadas por escala; (c) las unidades como una red [40–42]

2.1.5.2 Diagrama de sistemas

Los diagramas de sistemas se usan para indicar las entradas que son valoradas y sumadas con el fin de obtener la energía de un flujo o de un almacenamiento. Los diagramas tienen como propósito dirigir un inventario crítico de los procesos, depósitos y flujos que son importantes y tomados en cuenta para el sistema en estudio, además de necesarios para su evaluación. Los componentes y flujos dentro de los diagramas se organizan de izquierda a derecha, y reflejan la circulación de la energía disponible a la izquierda, disminuyendo a la derecha con cada transformación sucesiva de energía. Los símbolos y los caminos de conexión de un sistema se presentan en la Figura 2, estos son empleados en la construcción de diagramas de flujo para cada sistema en estudio.



Fuente de energía: Energía que acompaña a cada recurso usado por el ecosistema, como el sol, viento, las mareas, las olas en la playa, la lluvia, las semillas atraídas al sistema por el viento y las aves.



Depósito: Es un lugar donde la energía se almacena. Ejemplo: Recursos como la biomasa forestal, suelo, materia orgánica, agua subterránea, arena, nutrientes, etcétera.



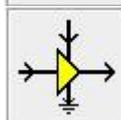
Camino energético: Flujo de energía o materiales.



Split: Un camino que se ramifica. Representa una división del flujo en dos del mismo tipo.



Interacción: Proceso que combina distintos tipos de flujos de energía y de materiales.



Amplificador: Amplificador de ganancia constante. Unidad que produce su salida multiplicando una salida por una ganancia factor, pero extrayendo energía de una segunda fuente.



Interruptor o desvío: Proceso que se inicia o termina, como un incendio o la polinización de las flores.

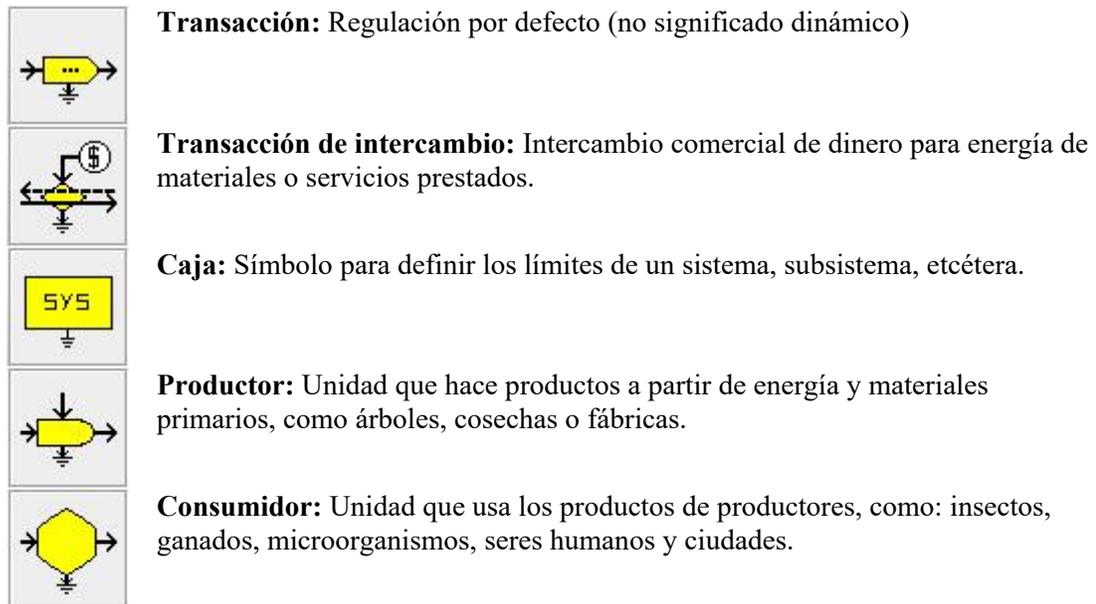


Figura 2 Símbolos de energía [39].

2.1.5.3 Tablas de evaluación eMergética

Las tablas de los flujos de materiales, el trabajo, y la energía son construidas con los diagramas. Los datos sin procesar sobre los flujos y las reservas o depósitos son convertidos en unidades de eMergía y posteriormente sumados para una circulación de la eMergía total al sistema. Las entradas que vienen desde el mismo origen son añadidas, para así evitar que se dupliquen. Solamente la entrada más grande se incluye. Si la tabla es para la evaluación de un proceso, se representan flujos por unidad de tiempo (generalmente por año). Si la tabla es para la evaluación de depósitos de reserva, se incluyen esos depósitos con un tiempo más largo de generación. Diferentes tablas son construidas para las evaluaciones de los flujos y de almacenamiento. Las tablas se elaboran en un mismo formato, y se encuentran dadas por los encabezamientos de columna tal y como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2 Ejemplo de una tabla de evaluación eMergética

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------|------------------|----------|----------|--------------------------------|--------------------------------|
| Nota | Concepto | Cantidad | Unidad | eMergía/unidad (seJ/unidad) | eMergía solar (E+15seJ/año) |
| 1 | Primer concepto | xx.x | seJ/año | xxx.x | xxx.x |
| 2 | Segundo concepto | xx.x | g/year | xxx.x | xxx.x |
| ... | | | | | |
| n | n concepto | xx.x | seJ/year | xxx.x | xxx.x |
| P | Producto | xx.x | xx.x | xxx.x | \sum seJ |

2.1.5.3.1 Índices eMergéticos

Para lograr una integración de todas las relaciones el análisis eMergético separa las entradas de fuentes renovables de las no renovables y de las entradas importadas al mismo sistema. Estas distinciones hacen posible que se puedan definir los índices eMergéticos, los cuáles proveen las herramientas necesarias para tomar decisiones en términos de sustentabilidad, especialmente cuando se tratan diferentes alternativas [43–45]. En la tabla 3 se muestra el resumen de los principales índices del análisis eMergético según Álvarez et al., 2006. Para cada uno se ofrece una breve explicación de su significado, así como de su método de cálculo a partir del diagrama de flujos resumido. Para cada sistema los índices serán calculados particularmente.

Tabla 3 Resumen de los principales índices del análisis eMergético (Álvarez et al.,)

| Índice | Fórmula | Unidades | Descripción |
|---|---------|----------|--|
| Flujo de eMergía renovable (Renewable eMergy flow) | R | seJ/año | Entrada de eMergía renovable al sistema. |

| | | | |
|--|-------------|-----------------|--|
| Flujo de eMergía no renovable (Indigenous non- enewable flow) | N | seJ/año | Entrada de eMergía no renovable al sistema desde fuentes internas al mismo. |
| Flujo de eMergía importado (Flow of imported eMergy) | F | seJ/año | Entrada de eMergía desde fuentes externas (generalmente con un intercambio monetario) |
| Producción de eMergía | $Y=R+N+F$ | seJ/año | Producción del sistema |
| Fracción renovable de la eMergía usada | R/Y | - | Fracción renovable de la eMergía empleada. |
| Índice de producción de eMergía (eMergy Yield Ratio; EYR) | $1+I/EIR$ | - | Mide la contribución potencial de un proceso al conjunto del sistema debido a la explotación de recursos locales. |
| Índice de inversión de eMergía (Environmental Investment Ratio; ELR) | $F/(R+N)$ | - | Relación fuentes externas al sistema y fuentes internas al mismo. Mide la eficacia en el uso de la eMergía invertida en un proceso. |
| Índice de carga ambiental (Environmental Loading Ratio; ELR) | $(F+N)/R$ | - | Índice de estrés ambiental debido a una producción. Indicador de la presión de un proceso de transformación sobre el medio ambiente. |
| Índice de eMergía renovable (Renewable eMergy Captured) | R/F | - | Índice de efectividad del sistema socioeconómico en la captación de los flujos naturales. |
| Consumo de eMergía por persona (eMergy per capita) | Y/población | seJ/persona/año | Medida del nivel de vida potencial medio de una población. |

| | | | |
|--|-----------------------|-------------------------|---|
| Densidad de potencia eMergética (Empower density) | Y/superficie del país | seJ/m ² /año | Índice de presión de un proceso sobre el territorio. |
| Capacidad de carga renovable (Renewable carrying capacity) | (R/Y)*población | Población | Estima de la población que podría mantenerse dependiendo solo de los recursos renovables. |
| Índice monetario eMergético (eMergy to money ratio; EMR) | Y/PIB | seJ/\$ | Relación eMergía con unidades monetarias. Análisis de relaciones comerciales. |
| Índice de sustentabilidad (eMergy sustainability index; ESI) | EYR/ELR | - | Medida de la contribución del sistema jerárquicamente superior a la producción del sistema por unidad de carga de este mismo. |

2.1.6 Cálculo de los índices eMergéticos

Los índices eMergéticos son de gran ayuda para la interpretación de resultados, para su cálculo, se presenta un resumen de los flujos de energía y materiales. En la Figura 3 se muestran las entradas ambientales correspondientes a R y N, los materiales y servicios como M y S, y el producto de salida representado como una Y. Posteriormente se suman los flujos para completar las tablas de análisis, para calcular una serie de índices de estado, esto brinda información sobre diversas propiedades del sistema en estudio. Además, los índices permiten comparar entre diferentes escenarios de gestión de un sistema, así como entre diferentes sistemas y, por lo tanto, se utilizan para evaluar la sostenibilidad de las dos técnicas analizadas (suelo estabilizado con cal y suelo estabilizado con PA).

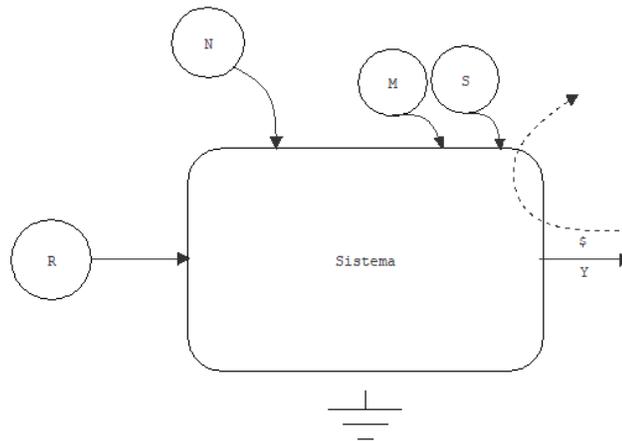


Figura 3 Resumen: Principales flujos de energía y materiales

Los índices de eMergía desarrollados por Odum (1971) definen la sustentabilidad en términos de la cantidad y calidad de la energía transformada por un determinado sistema de producción. Para su cálculo y análisis se utilizó el diagrama de tres brazos (Figura 4), ya que su representación facilita el cálculo.

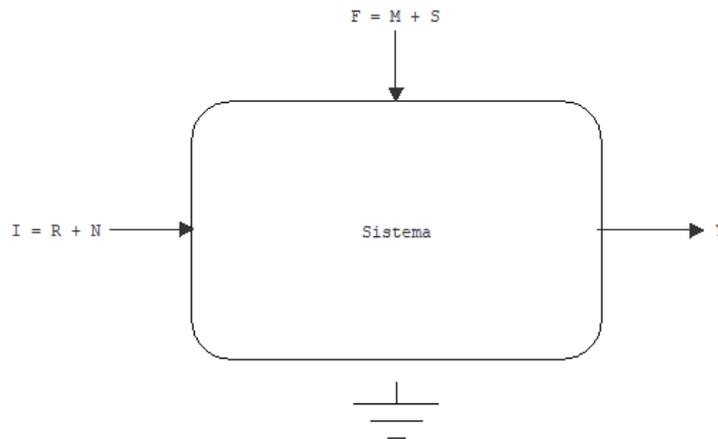


Figura 4 Diagrama de 3 brazos

De la Figura 4 se tiene qué:

I = Recursos Naturales Renovables (R) sumando a los Recursos Naturales No Renovables

F: Materiales (M) sumando a los servicios (S)

Y: Salida del sistema

De manera particular, los índices calculados en el estudio son:

EIR, el cual se calcula por la relación entre la contribución de la economía (F) y la Naturaleza (I). Se presenta como un indicador para comprender la intensidad de eMergía importada que se utiliza en el sistema de estudio. Es una medida del impacto potencial de una actividad en desarrollo que ejerce sobre el medio ambiente y es considerado como el Índice de eMergía adquirida externa al sistema y la residente en él.

EYR que se consideró en el cálculo como la relación entre la eMergía total que entra en el sistema (Y) y la contribución de la economía (F). Este índice es adimensional y permite conocer, el beneficio neto que el sistema ofrece a la economía global.

ELR se calcula como la relación entre la suma de los recursos no renovables de la naturaleza (N) y los de la economía (F) por los recursos renovables de la naturaleza (R), que al igual que los anteriores es adimensional. Si el valor de este índice es alto, mayor es el impacto ambiental del sistema. Además, indica que los costos de producción son más altos, y por lo que su precio final será incrementado haciendo que el producto sea menos competitivo en el mercado con una relación de carga ambiental más baja.

Y finalmente ESI empleado para indicar la contribución del medio natural, es decir, el trabajo energético que realizan los ecosistemas para la generación de procesos sobre la carga ambiental. Entre más alto es el valor significa que es más sustentable, valores cercanos a 0 indican la sostenibilidad del sistema. El cálculo se realiza dividiendo la contribución de la naturaleza (EYR) entre la carga ambiental (ELR).

2.2 Antecedentes

Derivado de investigaciones y trabajos previos que se han realizado, en este apartado se abordan qué suelos conforme a sus requerimientos han sido utilizados para la construcción con tierra, así como las normativas empleadas, que aunque son pocas, han tratado de regular y dar veracidad a este rubro de la construcción, promoviendo diferentes ensayos para la caracterización y clasificación de los suelos según los estabilizantes utilizados y el cómo determinar el porcentaje requerido de estos con el fin de lograr estabilizarlos para así mejorar su desempeño y durabilidad, finalizando con la activación alcalina que una vez determinado el comportamiento de los suelos se pueda aprovechar junto con el de la puzolana natural activada alcalinamente.

2.2.1 Suelos utilizados para técnicas de construcción con tierra

En México y en el mundo existen una gran diversidad de suelos utilizados y aprovechados según sus propiedades y características, y que para las civilizaciones y su desarrollo habitacional era necesario un material abundante en la naturaleza y con relativa facilidad de tratamiento que permitiera resistencia e impermeabilidad, por lo que la arcilla al cumplir con esas características se desempeñó como un material importante de edificación en grandes civilizaciones desde la antigüedad. Este tipo de suelo (Arcillas) al igual que el resto de los filosilicatos se basa en una estructura de apilamientos de planos de iones de oxígeno e hidroxilos, que básicamente se constituyen por silicatos de aluminio hidratados, que a su vez en algunas ocasiones se presentan como silicatos de magnesio, hierro o algunos otros materiales también hidratados que de manera general y de acuerdo con su estructura, la arcilla por sus minerales se clasifica en tres grupos: caolinitas, montmorillonitas e illitas, que tienen un tamaño de partícula menor a 2 micras y que se

considera que presentan una actividad eléctrica importante que determina su comportamiento [46,47].

El intercambio catiónico como propiedad fundamental de las arcillas, es la capacidad de cambiar los iones fijados en la superficie exterior de sus cristales en los espacios interlaminares o en algunos otros dentro del interior de su estructura por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes, esto se puede definir como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede absorber en un determinado pH, en donde los cationes intercambiables más usuales son Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , H^+ y $(\text{NH}_4)^+$ [48].

2.2.2 Normativa de construcción con tierra

Debido a que es primordial profundizar sobre la construcción con tierra y en especial la técnica de los bloques de tierra comprimida y de la normativa existente no solo en México sino también en todo el mundo, en la Tabla 4 se muestran las normativas encontradas, de las cuales destacan: La normativa Española UNE 41410 [49] y la normativa Colombiana NTC 5324 [50], las cuales presentan parámetros importantes y delimitados para la selección de los materiales (suelos) con relación a su granulometría y a los límites de consistencia, que son importantes dentro de la clasificación de los bancos de materiales para su aplicación en terracerías a fin de aprovechar las propiedades físicas del material.

Tabla 4 Normativa BTC en el mundo

| País | Norma/Reglamento | Organización | Anotaciones |
|---------------|----------------------------------|---------------------|---|
| Brasil | NBR 8491, 1986 NBR 8492, 1986 | ABNT | BTC estabilizados con cemento, especificaciones y métodos de ensayo |

| | | | |
|------------------------|-----------------------|---------|--|
| | NBR 10832, 1989 | | Procedimiento para la fabricación de BTC con fuerza de compactación manual e hidráulica |
| | NBR 10833, 1994 | | |
| | NBR 10834, 1994 | | Especificaciones y métodos de ensayo de bloques de suelo-cemento |
| | NBR 10835, 1994 | | |
| | NBR 10836, 1994 | | |
| Colombia | NTC 5324, 1996 | ICONTEC | Bloques de tierra comprimida estabilizados con cemento |
| EE. UU. | NMAC, 14.7.4, 2004 | CID | Reglamento Estatal de Nuevo México |
| España | UNE 41410:2008 | AENOR | Primera Norma Europea |
| Francia | XP P13-901, 2001 | AFNOR | Norma Experimental |
| India | IS 1725:1928 | BIS | Bloques de suelo-cemento |
| Italia | Ley n° 378, 2004 | | Leyes para la conservación del patrimonio |
| | L.R. 2/06 2, 2006 | | |
| Kenia | KS 02-1070: 1999 | KEBS | Bloques de tierra comprimida |
| México | NMX-C-508-ONNCCE-2015 | NMX | Especificaciones y métodos de ensayo de los Bloques de Tierra Comprimida (BTC) estabilizados con cal |
| Nigeria | NIS 369: 1997 | SON | Bloques de tierra estabilizados |
| Nueva Zelanda | NZS 4297, 1998 | SNZ | Bloques de suelo estabilizados |
| | NZS 4298, 1998 | | |
| | NZS 4299, 1999 | | |
| Regional África | ARS 681, 1996 | ARSO | Bloques de tierra comprimida |
| | ARS 682, 1996 | | |
| | ARS 683, 1996 | | |
| Sri Lanka | SLS 1382-1: 2009 | SLSI | Bloques de suelo comprimido |
| | SLS 1382-2: 2009 | | Bloques de suelo comprimido estabilizados |
| | SLS 1382-3: 2009 | | |
| Túnez | NT 21.33: 1996 | INNORPI | Bloques de suelo |
| | NT 21.35: 1996 | | |

Estas normativas están enfocadas únicamente en técnicas de construcción con tierra, sin embargo, muchos de los ensayos se apoyan en normativas existentes sobre geotecnia y de esa manera clasificar y comparar el suelo para garantizar un buen comportamiento.

2.2.3 Ensayos de caracterización para la clasificación de suelos

Para seleccionar un suelo ideal que pueda ser utilizado no solo para técnicas de construcción con tierra sino también para otras aplicaciones dentro de la rama ingenieril como las terracerías en pavimentos, es necesaria la correcta clasificación y posteriormente la selección de los suelos a utilizar, en este trabajo se hace referencia a las normas

mexicanas sobre geotecnia que publica el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE) y que se mencionan en la Tabla 5 para la clasificación y la selección de suelos [51–56]:

Tabla 5 Objetivos y alcance de las Normas Mexicanas sobre Geotecnia aplicadas a Técnicas de Construcción con Tierra

| Objetivo del método de prueba | Designación | Alcance |
|---|-----------------------|---|
| NMX-ONNCCE | | |
| Tomar apropiadamente muestras de suelo alterada e inalterada. | NMX-C-431-ONNCCE-2002 | Obtener una porción representativa de los materiales y evitar su contaminación con polvo o cualquier otra sustancia. |
| Preparar las muestras de suelo como una fracción homogénea. | NMX-C-468-ONNCCE-2013 | Preparar las porciones representativas para efectuar los ensayos de laboratorios necesarios. |
| Determinar la composición granular del suelo (Gravas, Arenas y Finos). | NMX-C-496-ONNCCE-2014 | Efectuar el ensayo de granulometría para conocer no solo la cantidad y el tamaño de partículas que conforman los distintos bancos de suelo, sino también la forma y textura de estos. |
| Analizar la consistencia de los suelos (Limite Líquido, Limite Plástico y Limite de Contracción). | NMX-C-493-ONNCCE-2018 | Comprender la consistencia de los suelos y tener una pronta identificación como arcilla o limo, y conocer una importante propiedad como lo es la plasticidad y así entender la trabajabilidad y moldeado de los suelos, para evitar su contracción y agrietamiento. |

| | | |
|---|-----------------------|---|
| Encontrar la masa volumétrica seca máxima y el contenido de humedad. | NMX-C-476-ONNCCE-2013 | Encontrar la correcta compactación de cada muestra de suelo a su correcta condición de humedad. |
| Determinar el Valor Soporte de California de Suelos y Expansión en Laboratorio. | NMX-C-522-ONNCCE-2016 | Determinar la calidad de los suelos medida en características de resistencia y deformación. |

Sin embargo, todas estas normas están firmemente enfocadas en los aspectos físicos del material, y, que para la comunidad científica especialmente a los desarrolladores de nuevas técnicas de construcción con tierra estos aspectos físicos y de consistencia de los suelos no son suficientes, pues se deja del lado la composición química y mineralógica de estos materiales, por lo que se recurre a análisis complementarios para conocer a fondo el comportamiento y las propiedades que a raíz de éstas se puedan aprovechar y mejorar si es el caso con algún estabilizante de por medio. Es así como se recurre a la caracterización por la técnica FRX Fluorescencia de Rayos X para determinar el contenido (porcentaje en peso) de todos los compuestos que conforman los bancos de suelo, además de un análisis DRX Difracción de Rayos X para encontrar las fases minerales principales de cada uno de los bancos.

También es importante destacar que para efectuar los ensayos de granulometría y consistencia referentes a las normas NMX-C496-ONNCCE y NMX-C-493-ONNCCE respectivamente, es necesario efectuar una comparativa con las normas españolas UNE-41410 y las normas colombianas NTC-5324 enfocadas al desarrollo de la Construcción con Tierra Comprimida con la técnica BTC Bloques de Tierra Comprimida como es el caso de esta investigación, ya que las normas de Geotecnia antes mencionadas al igual que la norma mexicana NMX-C-508-ONNCCE-2015 Industria de la Construcción -

Bloques de Tierra Comprimida Estabilizados con Cal - Especificaciones y Métodos de Ensayo, carece de lineamientos de vital importancia que hagan referencia a estos aspectos físicos de granulometría y consistencia, por lo que esta comparativa aportará información valiosa para la fabricación de estos elementos de construcción y su posible aplicación con otras técnicas y otras ramas de la ingeniería.

2.2.4 Estabilización de suelos con cemento

El cemento portland es considerado como uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción y también, como se ha mencionado anteriormente un estabilizante esencial tanto en suelos como en técnicas de construcción con tierra como los bloques de tierra comprimida, pero a su vez, su producción ha sido altamente relacionada con el calentamiento global debido a las grandes temperaturas durante su proceso de producción, así como a un consumo energético y de recursos naturales excesivo. [57]. Su gran uso se debe a algunos de los componentes principales del cemento como lo son el silicato tricálcico (3CaO-SiO_2) y el silicato dicálcico (2CaO-SiO_2) que también son conocidos como C_3S Alita y C_2S Belita respectivamente, que producen los mismos tipos de gel CSH (Silicatos de Calcio Hidratados) siendo la fase principal de hidratación y la responsable de la resistencia mecánica de las mezclas para estabilizar distintos tipos de suelos.

2.2.5 Estabilización de suelos con cal

Después del cemento, otro material ampliamente utilizado para estabilizar suelos finos y ricos en sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3) es la cal, que se emplea como un consolidante pues al ser adicionada a estos tipos de suelo con agua, el medio acuoso

permite la llegada de calcio a las partículas de arcillas presentes, dónde se produce un intercambio catiónico que consiste en que los iones sílice y alúmina se reemplazan por iones de calcio, que reaccionan con la sílice y la alúmina generando una reacción puzolánica en la cual se forman compuestos cementantes como el CSH (Silicatos de Calcio Hidratados) y CAH (Aluminatos de Calcio Hidratados) [58–61], estas reacciones incrementan la manejabilidad y disminuyen la permeabilidad del suelo mejorando sus propiedades de resistencia incrementando el límite de contracción del suelo y provocando una disminución del límite líquido y el índice plástico [62].

2.2.6 Estabilización de suelos con puzolanas naturales

A diferencia del cemento portland y la cal, las puzolanas naturales activadas alcalinamente no consumen grandes cantidades de energía, puesto que se realizan a relativamente bajas temperaturas, por lo que se presentan como una alternativa más ecológica y sustentable. Donde la actividad puzolánica característica de estos materiales se refiere a la cantidad máxima con la que un hidróxido de calcio se puede combinar y la velocidad a la que ocurre esta reacción [63,64]. Esto se resume en *Puzolana + Hidroxido de Calcio + Agua → Silicatos y Aluminatos de Calcio Hidratados*. En este contexto, ha surgido la necesidad del desarrollo de materiales alternativos que puedan reducir la huella de carbono y a su vez que puedan conservar las propiedades aglutinantes del cemento, a partir de esto se ha dado paso a los materiales cementantes activados alcalinamente, es así como desde hace ya varios años la comunidad científica ha incrementado su interés de estudiar estabilizantes artificiales de suelo alternativos a el cemento y la cal para distintas técnicas de construcción con tierra como los bloques de

tierra comprimida evaluando sus propiedades, principalmente el desempeño mecánico, su producción, el tiempo de curado entre otras.

Con el fin de presentar los avances más relevantes de las investigaciones de los estabilizantes de BTC, en la Tabla 6 se muestran algunos autores [2,65–84] y las variables que tomaron en cuenta para su investigación, así como el tipo de estabilizante (porcentajes), las propiedades del suelo (composición química, granulometría y límites de Atterberg), los BTC (Dimensiones y propiedades así como su desempeño) y el proceso de producción (Energía térmica consumida, fuerza de compactación, tiempo de curado, entre otros).

Tabla 6 Tabla de autores y variables

| | B. V. Venkatarama Reddy and S. R. Hubli, 2002 | Fetra Venny Riza, Ismail Abdul Rahman, Ahmad Mujahid Ahmad Zaidi, 2011 | Daniela Ciancio, Joshua Gibbings, 2011 | Younoussa Millogo, Jean-Clau de Morel, 2012 | R. Bahar, M. Benazoug, S. Kenai, 2004 | Peter Walker and Trevor Stace, 1996 | M. Ahenz, L. Fenu, 2005 | Zhang Jitu, CA O Xing, 2002 | Neeraj Kumar Harma, S. K. Swain, Umesh C. Sahoo, 2012 | Susana Serrano, Camila Barreneche, Lidia Rincón, Dieter Boer, Luisa F. Cabeza, 2012 | Saikat Maitra, Farooq Ahmad, Ananta K Das, Santanu Das, and Binay K Dutta, 2009 | A. Basumajumdar, A. K. Das, N. Bandyopadhyay and S. Maitra, 2004 |
|-----------------------------|---|--|--|---|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|---|---|---|--|
| Estabilizante | | | | | | | | | | | | |
| Cemento | 2%+ | 4 - 10% | 10% | 4 - 12% | 0 - 20% | 5-10% | | | | | | |
| Cal | 8%+ | 1 - 3% | | | | | | 4-6%+ | | 0-10%+ | 1-70%+ | |
| Yeso | | | | | | | | | | | | |
| Ceniza volante | 10%+ | | | | | | | 40-50%+ | 15-30% | | 87-96%+ | 70-90% |
| Fibras vegetales | | | | | | | 10mm | | | | | |
| Fibras neumáticas | | | | | | | | | | 5-10%+ | | |
| Propiedades de Suelo | | | | | | | | | | | | |
| Arena | 35.7%+ | | | | 0.63 mm | SW-SM | 48.00 % | 13.16% | | 50% | | |
| Limo | 20.3%+ | | | | | | 51.50 % | 74.49% | | | 40% | |
| Arcilla | 0.002mm+ | | | 5mm | | | | 68-82%+ | 7.45 % | 42.50 % | | |
| Grava | | | | | | | | | | 7.50% | | |

| | | | | | | | | |
|--|-------------------------------|-----------------------------------|------------------------|-------|---------|----------------|----------------------------|-----------------------------------|
| Piedra caliza | 19mm+ | | | | | | | |
| Suelo laterítico | 13mm+ | | | | | | | |
| Gravedad específica | 3.02 | | | 2.2 | | 2-50% | 2.50% | |
| | g/cm ³ | | | %+ | | | | |
| Densidad aparente | 1.06 | | | | | | | |
| | g/cm ³ | | | | | | | |
| Densidad específica | 17.6 | | | | | | | |
| | kN/m ³ | | | | | | | |
| Módulo de elasticidad | 2.51 | | | | | | | |
| | GPa | | | | | | | |
| Absorción | 16.9 | | | | | | | |
| | 6% | | | | | | | |
| Límites de Atterberg | | | | | | | | |
| Límite Líquido | 53.10% | | 39% | 69% | 62.20% | 34.79% | | |
| Límite Plástico | 25.70% | 15 - 20% | | | 25.10% | 20.44% | | |
| Índice Plástico | 27.40% | | 15% | 38% | 37.10% | 13.34% | | |
| BTC | | | | | | | | |
| Dimensiones L x A x P | 230x190 x100 mm | 337.5x12.5x225 | 200x200 x75-200mm | Adobe | Suelo | 125x125x140 mm | 40x20x10 cm | 40x40 x160 mm |
| Resistencia a compresión promedio | 6.89 Mpa | Aumento del 70% | > 5MPa | | 7.3 Mpa | 7.11 | 4.4 Mpa | 63.38 kPa, 4.87 N/mm ² |
| Densidad | 1500 - 2000 kg/m ³ | | 2091 kg/m ³ | | | | | |
| Valor térmico | | 0,2545 ± 0,0350 W m ⁻¹ | | | | | | |
| Efecto endotérmico | | | 350° | | | | | |
| Producción | | | | | | | | |
| Energía térmica consumida | 6.7 M | | | | | | | |
| Fuerza de compactación | | 5 - 20 Mpa | | | | 50 Kpa | 200-325 kg/cm ² | 200-250 kg/cm ² |
| Co2/Tonela da | | 22 kg | | | | | | |
| Tiempo de curado | | | | | | | | 50-55 días |

En relación con la Tabla 6 es evidente que los bloques de tierra comprimida que han alcanzado mayor difusión y por lo tanto han sido mayormente estudiados y sobre los que es posible encontrar normas más establecidas para su manejo y elaboración son todos aquellos en los que se utiliza cemento y cal como estabilizantes, mientras que por otra

parte los que aún se encuentran en fase experimental, con poca difusión y con aún menos estudios son a los que se les agrega aceites vegetales, mucílagos, emulsiones o plásticos triturados, entre otros materiales. Para el caso del cemento y la cal lo que más se puede destacar es: -El intercambio iónico donde las arcillas suelen tener cationes de sodio, potasio y magnesio que logran atraer con fuerza al agua como resultado de un desequilibrio en sus cargas superficiales y que al incorporarse cal a la tierra se integran iones de calcio que remueven a los de sodio, potasio y magnesio, de los cuales los porcentajes utilizados van desde un 2% a un 20% para cemento recomendando del 7% al 12% y dependiendo los casos cal del 4% al 7% de cal apagada y de 2% al 5% de cal viva extendiéndose hasta un 20% ; -Las reacciones puzolánicas que es un proceso lento en el que reacciona la cal con los óxidos presentes en las arcillas generando silicatos y aluminatos de calcio que tienen un alto poder cementante; -La carbonatación que es una reacción todavía más lenta en la que el hidróxido de calcio se combina con el bióxido de carbono del aire y forma cristales que atrapan a los minerales a su alrededor aumentando la cohesión en conjunto; -La eficiencia energética de construcciones con tierra en particular los bloques de tierra comprimida, donde se han reportado una energía consumida que va desde los 0.0024 KJ hasta los 0.0420 KJ dependiendo del sistema de compactación y los estabilizantes empleados pero siempre una menor energía requerida que los tabiques rojos recocidos y los blocks de cemento [85].

Sin embargo, es necesario puntualizar que no se debe dejar todas las propiedades al estabilizante, sino más bien aprovechar las cualidades del suelo como aglomerante natural, ya que éste interactúa con el estabilizante con relación a su composición y distribución, es así como surge la importancia de una buena selección de materia prima

(suelo) que en compañía de la estabilización y la debida fuerza de compactación garantiza el funcionamiento en conjunto de suelo-estabilizante [86–89]. De manera que existen experiencias previas sobre el buen funcionamiento de los bloques de tierra comprimida estabilizados con cal y cemento, Sin embargo, existe interés en estudiar otros medios estabilizantes, como el realizado por Tchouateu et al [90], que utilizaron puzolana natural activada como medio de estabilización. En este trabajo se determinó el efecto sobre diferentes suelos estabilizados con una puzolana natural con sulfato sódico. Se preparó una mezcla única de polvos, que se activan con la simple adición de agua a la mezcla de suelo y puzolana. Las puzolanas naturales de arena volcánica tienen poco o ningún valor como material de construcción, por lo que, si se demuestra la viabilidad y facilidad de uso dentro de un material de construcción como bloques, podría dar una oportunidad para una opción de construcción que reduce aún más el uso de materiales industrializados, es por eso que exploramos CEB y CBR, con la posibilidad de su uso en terraplenes de pavimento debido a su excelente oposición a la deformación.

2.2.7 Determinación del porcentaje de estabilizante en suelos

James L. Eades Investigador en U. Illinois y Ralph Early Grim Geólogo de Yale, en la década de 1960 investigaron que, cuando se mezcla un suelo arcilloso con cal empiezan a haber reacciones tipo puzolánicas. De manera que la sílice y la alúmina presentes en los suelos arcillosos comienzan a reaccionar y formar dos elementos cementantes importantes, los geles $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ CSH y $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ CASH, siendo los responsables del aumento en la resistencia de los suelos y de la resistencia en los ciclos de humedecimiento y secado. Siendo en 1966 cuando desarrollaron el famoso

método Eades & Grim “A Quick Test to Determine Lime Requirements for Lime Stabilization” que actualmente se encuentra normado por la (ASTM-D-6276-99a, 2017 [91]) para determinar el porcentaje mínimo de Cal requerido para estabilizar un suelo, dónde el principio se basa en que al elevar el pH por encima de 10 se liberan la sílice y la alúmina del suelo (se hacen solubles) para reaccionar con el calcio donde el menor porcentaje en alcanzar el pH de la cal (12.45) es el porcentaje mínimo para satisfacer las necesidades de estabilización.

En la actualidad y basados en el principio de Eades & Grim. Philbert Nshimiyimana, Luc Courard y Nathalie Fagel [92,93] además de la medición del pH, midieron la conductividad eléctrica (CE) la cual resultó ser una útil herramienta para monitorear la maduración de la reacción en las soluciones de mezcla evaluando el efecto de la reactividad de los materiales, es decir, que a medida que avanza el tiempo de curado disminuye la CE y al alcanzar los valores mínimos de conductividad se alcanza el punto máximo de maduración de la reacción y de resistencia a compresión por lo que únicamente se prueban especímenes de material arcilloso durante este tiempo establecido, como una manera de no desperdiciar materia prima y mantener los lineamientos de sustentabilidad.

2.2.8 Durabilidad en la construcción con tierra

Cuando se habla de durabilidad en las estructuras de tierra, vemos que se encuentra atestiguada por el hecho de que algunos de estos edificios perduran cientos de años. Esto, por lo general, porque son sometidos a un mantenimiento continuo y de reparaciones adecuadas, y protegidos correctamente por un techo y/o con la integración de algún

estabilizante, siendo el agua el principal inconveniente potencial para la construcción con tierra en general.

De hecho, los muros levantados por alguna técnica de construcción con tierra pueden erosionarse bajo el impacto de la lluvia y ocasionando el colapso de la estructura cuando es expuesta a una lluvia continua durante varias horas. Además, la absorción de agua puede propiciar la retracción de los minerales de arcilla, mientras que la evaporación del agua da lugar a la contracción y el agrietamiento. Por lo que, los suelos que no están protegidos sufren en gran medida los problemas de durabilidad debido a la erosión, penetración y evaporación del agua.

Los ensayos de durabilidad más comúnmente utilizados actualmente son la prueba de abrasión hídrica y la prueba de erosión por goteo, y son mencionados para bloques de tierra comprimida tanto en normas nacionales como internacionales. Además, han sido replicadas en numerosos artículos de investigación. Sin embargo, siguen considerándose empíricos, siendo el ensayo de abrasión casi una réplica de la erosión que provoca el agua de lluvia simulando ciertas condiciones reales, mientras que el ensayo de erosión por goteo es un ensayo menos abrasivo que simula condiciones en zonas de poca lluvia.

Ambos ensayos se rigen bajo el mismo principio, que es el someter a la muestra a una presión constante durante un determinado tiempo o hasta que erosione la muestra, observando desde el número de muestras hasta el tiempo, distancia de aplicación, altura, etcétera, con el fin de determinar posteriormente el daño causado. Todo en función del agua, siendo el principal agente reductor de la durabilidad en la construcción con tierra. Ya que, aunque la resistencia suele ser la fuente principal de preocupación en términos de

construcción, no se puede negar que las estructuras de tierra suelen fallar a problemas de durabilidad más que de resistencia. Es por lo anterior que la construcción con tierra y las demandas del material y el estabilizante a utilizar se vuelven cada día más ambiciosas, con la necesidad de prolongar la longevidad de los materiales. Esto se ha asociado en su mayor parte con la resistencia, es decir, altas resistencias se especifican para propiciar la resistencia previa contra el daño, en lugar de resistir las cargas estructurales.

Por otro lado, también se asocia la durabilidad a un menor mantenimiento, esto en percepción de los materiales de construcción modernos (concreto, mampostería, acero) ya que son duraderos en lo que respecta a su vida útil en cuanto a diseño, ya que ha disminuido el mantenimiento regular preventivo y esto se percibe como mayor durabilidad. Es así como para la construcción con tierra, la suposición de una mayor resistencia y un menor mantenimiento pone en énfasis y en preferencia los métodos de construcción con materiales estabilizados, es decir, la incorporación de productos como el cemento y la cal para aglomerar las partículas de suelo. Sin embargo, este tipo aglutinantes exhiben energías incorporadas más altas desde su fabricación hasta su uso y por lo tanto contrarrestan el objetivo principal de la construcción con tierra que es el reducir la energía incorporada, siendo la activación alcalina de las puzolanas naturales un método estabilizante (tierra/suelo) capaz de cumplir con ambos propósitos.

2.2.9 Activación alcalina

La activación alcalina consiste principalmente en utilizar reactivos alcalinos en forma de hidróxidos o sales alcalinas, tales como el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), hidróxido de sodio (NaOH), hidróxido de potasio (KOH), silicato de sodio (Na_2SiO_3) y

sulfato de sodio (Na_2SO_4), para formar un entorno alcalino fuerte como agente aglutinante. Los inicios en investigación sobre aglutinantes activados con álcalis se enfocaron principalmente en la activación de escorias de alto horno, subproductos de la industria metalúrgica, dónde informaron sobre el tipo de activador, dosis, temperaturas de curado, el área superficial específica, relaciones molares y características de la escoria, afectando directamente al proceso de activación alcalina. Este tipo de aglutinantes activados alcalinamente, son más resistentes y podrían reducir significativamente el consumo del cemento portland a la mitad o hasta sustituirlo por completo.

En general, existen dos tipos de mecanismos de reacción para los aglutinantes activados alcalinamente, el primero implicando la activación alcalina de materias primas ricas en calcio, como la escoria de alto horno y más recientemente a materias primas naturales como las puzolanas. Este proceso de activación se lleva a cabo utilizando soluciones baja o medianamente alcalinas, lo que da espacio a la formación de fases similares a los hidratos de silicato de calcio como productos de reacción. Otro tipo de mecanismo de reacción sería la activación alcalina de materias primas libres de calcio y bajas en calcio, dónde se recurre a soluciones altamente alcalinas, lo que da como resultado la formación de redes poliméricas similares a las fases amorfas de las zeolitas con una alta resistencia mecánica, tal como la del cemento Portland. En pocas palabras, la activación alcalina de un material puede describirse como una mezcla de un líquido (con una concentración de álcali muy alta) y un sólido (con las proporciones adecuadas de silicato y aluminato altamente reactivos). El sólido y el líquido se pueden mezclar en proporciones variables dependiendo la finura del material sólido (cuanto más fino el material, mayor es la demanda de agua). Este proceso relacionado con las puzolanas

naturales comienza con el Si y Al disueltos en un medio acuoso para formar hidratos alcalinos.

En el caso de los sistemas activados alcalinamente, en términos generales, hace referencia a que cualquier material que contenga sílice y alúmina en forma reactiva, y que posea un alto grado de desorden o una estructura cristalina que sea suficientemente soluble en un medio alcalino puede usarse como precursor, siendo las puzolanas naturales un material con características ideales necesarias y con alto potencial para ser utilizado como precursor y ser activado alcalinamente y poder ser implementado como un agente estabilizador de suelos y dar pauta a un material de construcción sostenible.

CAPÍTULO 3. MÉTODO EXPERIMENTAL

La metodología propuesta se basa originalmente en un acercamiento sobre el uso de la tierra como material de construcción a lo largo de la historia, cambiando y manteniendo la atención para la cual se recopiló y analizó de la información de libros, artículos de investigación, informes de la construcción, webs especializadas de entidades, instituciones, fabricantes etc. sobre la construcción con tierra, de todas sus tipologías, incluidos los BTC. Esta metodología de trabajo se puede descomponer en las siguientes etapas:

3.1 Etapa 1: Caracterización de materiales

La etapa 1, está relacionada en caracterizar las propiedades físicas y químicas del suelo y las puzolanas naturales para estabilizar suelos mediante el uso de técnicas de caracterización microestructural. Se tienen las siguientes metas:

1. Profundizar sobre técnicas de construcción con tierra, analizando su composición, su proceso de fabricación y sus distintos usos en la industria de la construcción.
2. Analizar la normativa existente referente a la estabilización de suelos, a la construcción con tierra y en especial de la construcción con BTC.
3. Obtención de materias primas y materiales para la producción de suelos estabilizados por medio de puzolanas naturales activadas alcalinamente.
4. Caracterizar la parte física de los materiales propuestos, es decir, suelos y puzolana natural para fabricar suelos estabilizados por medio de: análisis granulométrico, límites de Atterberg, densidad y su clasificación ASTM.

5. Caracterizar la parte química y mineralógica de los materiales haciendo uso de técnicas de caracterización como FRX y DRX.

3.2 Etapa 2: Selección de suelos

La etapa 2, consistió en seleccionar un suelo con relación a sus características físicas y un suelo con relación a sus características químicas y posteriormente estabilizarlos con la adición de puzolanas naturales activadas alcalinamente.

1. Se compararon las características físicas, químicas y mineralógicas de los suelos para determinar los suelos a estabilizar además de la Relación de humedad y densidad (Proctor Estándar) y la Relación de Soporte California (CBR).

3.3 Etapa 3: Evaluación de las dosificaciones

En la etapa 3, se evaluó la cantidad de suelo y el contenido de PA como estabilizante en técnicas de construcción con tierra.

1. Se evaluaron suelos estabilizados con cal y PA probando distintas dosificaciones y monitoreando pH y CE (Suelo-cal y Suelo-PA de 2.5%, 5%, 7.5% y 10% para ambos sistemas).
2. Se realizó una comparativa de calorimetrías-CE de BIZ con los diferentes sistemas para comparar y buscar cómo reacciona cada elemento solo (suelo, cal, puzolana natural y sulfato de sodio) y en conjunto (sistemas elaborados para cubos y soluciones).

3.4 Etapa 4: Resistencia a compresión y durabilidad de los suelos estabilizados

La etapa 4 se encuentra enfocada en determinar las propiedades mecánicas y de durabilidad de los suelos estabilizados con puzolanas naturales activadas alcalinamente.

1. Para probar RC se elaboraron cubos de 5 x 5 cm por medio de una prensa manual de diseño propio de los distintos sistemas de suelos naturales y estabilizados con cal y PA para asemejar a escala la técnica de construcción con Bloques de Tierra Comprimida (BTC) conforme a la norma NMX-C-508-ONNCE. Se realizaron los ensayos a compresión de las muestras curadas a 7, 14, 28, 90 y 180 días.
2. Se realizaron ensayos de durabilidad de humedecido/secado, por goteo, abrasión hídrica e inmersión total de cubos curados a 28, 90 y 180 días.
3. Se elaboraron CBR convencionales conforme la norma NMX-C-522-ONNCE para confirmar la estabilización de los suelos y su oposición a la deformación en condiciones críticas de trabajo (saturados) para evaluar su desempeño como capas en la estructura de pavimentos. Se realizaron ensayos con muestras curadas a 7 y 28 días.

3.5 Etapa 5: Análisis eMergético

La etapa 5, con el fin de demostrar la eficiencia energética y la sostenibilidad de los suelos estabilizados con cal y suelos estabilizados alcalinamente como alternativa de construcción. A través de la contabilidad del flujo eMergético usando una base termodinámica de todas las formas de energía, recursos y servicios humanos (mano de obra) convirtiéndolos en equivalentes de energía (emjoules solares, abreviado como seJ) de acuerdo con los pasos que se mencionan a continuación:

1. Creación de diagramas de los sistemas de flujos de energía para conocer las relaciones entre los componentes y los flujos de los recursos de los suelos estabilizados con cal y los suelos estabilizados con PA.
2. Elaboración de las tablas de análisis de eMergía basada en los diagramas creados indicando las transformidades.
3. Cálculo de los índices de carga ambiental y de sostenibilidad ambiental de los suelos estabilizados con cal y suelos estabilizados con PA.
4. Interpretación y comparación de los índices calculados que permiten diagnosticar la viabilidad económica y capacidad de carga de los sistemas de suelos estabilizados con cal y suelos estabilizados con PA.

3.6 Desarrollo de la Etapa 1: Caracterización de materiales

En este apartado, se abordará el proceso de identificación y tratamiento de la puzolana natural y los activadores, así como la identificación de los bancos de suelos para analizar las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los materiales utilizados en esta investigación. Este proceso es crucial para determinar la idoneidad de los materiales para esta aplicación específica de estabilizar suelos. Además, se mencionan los métodos y equipos de caracterización, así como los parámetros a considerar.

3.6.1 Identificación y tratamiento de la puzolana natural y activadores

La puzolana natural obtenida es una arena volcánica ubicada en la región de San Isidro, Guanajuato. Los activadores se adquirieron de manera comercial en forma de polvo sólido blanco, sulfato de sodio (Na_2SO_4) reactivo de grado industrial con una pureza por encima del 96% e hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) marca CALIDRA.

Para la puzolana natural a manera de aumentar su reactividad y uniformizar el tamaño de sus partículas se sometió a molienda durante 60min en un molino de rotación planetaria vibratorio de alta energía marca SWEquipos DM-1 de 1200 rpm, ½ HP y 440V, posteriormente se realizó un análisis de distribución de tamaño de partícula (DTP) mediante un equipo Microtrac S3500 Particle Size Analyzer. Además, la densidad de la puzolana natural y de la cal, se determinó por medio de un picnómetro Pentapyc 5200e de Quantachrome.

3.6.2 Identificación de bancos de suelos

Para la investigación se identificaron 5 bancos de suelos ubicados en diferentes puntos del estado de Nuevo León para caracterizarlos e identificarlos de manera que se seleccione un banco que de acuerdo con sus propiedades tanto físicas y químicas se presente como el mejor candidato para ser estabilizado a través de puzolanas naturales activadas alcalinamente. De este modo, se encontraron el Banco 1 El Zayre (B1 Zayre), el Banco 2 Dominio Cumbres (B2 Cumbres), Banco 3 Maqlub (B3 Maqlub), Banco 4 Moya (B4 Moya) y Banco 5 Cerritos (B5 Cerritos) de los cuales se detalla su ubicación, su caracterización y su clasificación (Figura 5).

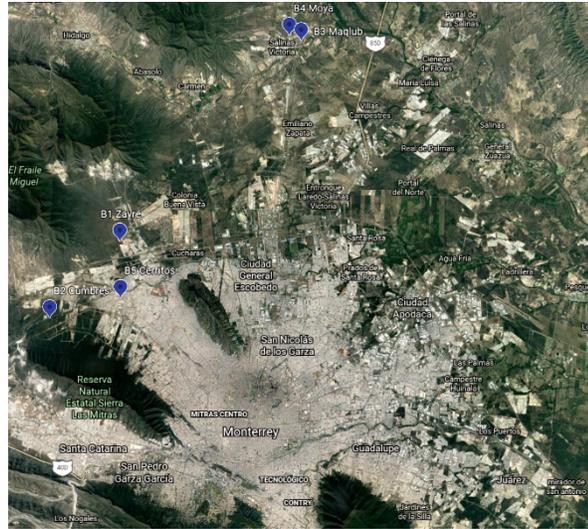


Figura 5 Vista aérea general de la ubicación de los 5 bancos identificados en el estado de Nuevo León (B1 Zayre, B2 Cumbres, B3 Maqlub, B4 Moya y B5 Cerritos)

3.6.3 Ubicación de bancos de suelo identificados en el Estado de Nuevo León

3.6.3.1 Ubicación B1 Zayre

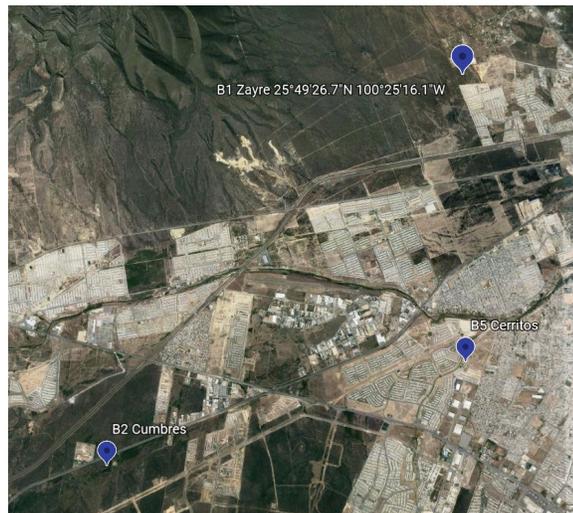


Figura 6 Ubicación B1 Zayre 25°49'26.7\"/>

El Banco 1 Zayre se encuentra en la localidad de San Miguel de los Garza situada en el Municipio de Gral. Escobedo al Noreste del estado de Nuevo León y cerca de los bancos B2 Cumbres y B5 Cerritos con una latitud de $25,8240833^\circ$ y una longitud de -

100,4211389° a una distancia de 22 km aproximadamente del Instituto de Ingeniería Civil de Estudios de Posgrado de la Universidad Autónoma de Nuevo León (Figura 6).

3.6.3.2 Ubicación B2 Cumbres

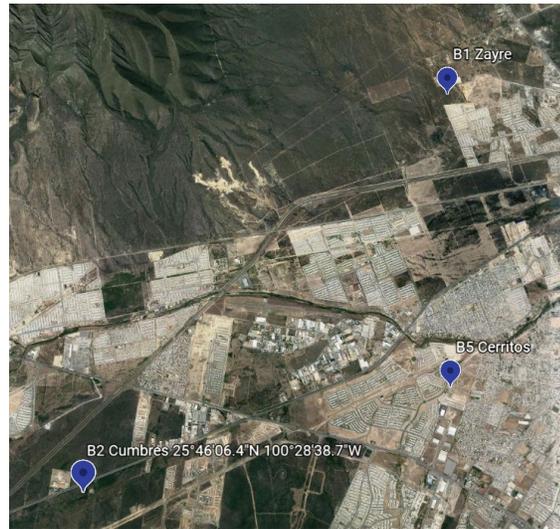


Figura 7 Ubicación B2 Cumbres 25°46'06.4"N 100°28'38.7"W

El Banco 2 Cumbres se encuentra a 25°46'06.4" N y 100°28'38.7" W del estado de Nuevo León en Dominio Cumbres (Figura 7) cerca de los bancos B1 Zayre y B5 Cerritos con una latitud de 25,7684444° y una longitud de -100,4774167° a una distancia de 27 km aproximadamente del Instituto de Ingeniería Civil de Estudios de Posgrado de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

3.6.3.3 Ubicación B3 Maqlub

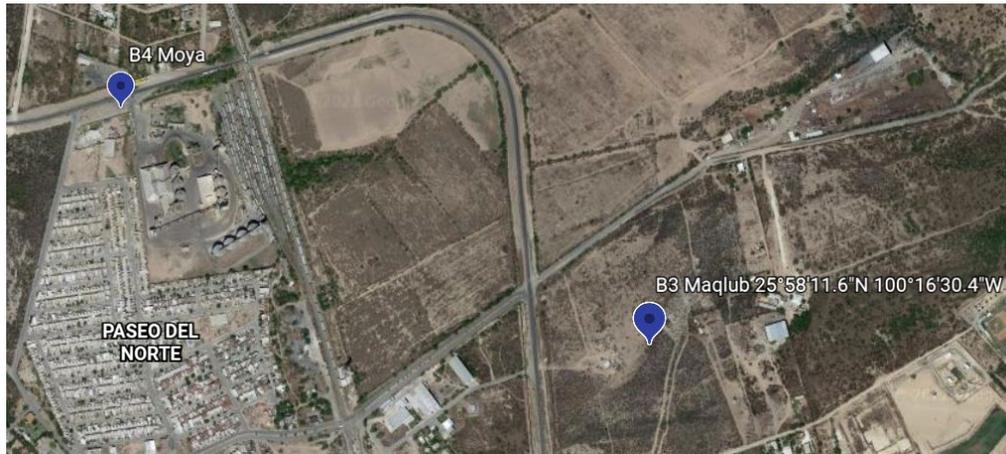


Figura 8 Ubicación B3 Maqlub 25°58'11.6"N 100°16'30.4"W

El Banco 3 Maqlub (Figura 8) se encuentra en el Municipio de Salinas Victoria localizado en la región del Golfo, encontrándose ubicado al Noroeste del estado de Nuevo León y con una relativa cercanía del banco B4 Moya con una latitud de 25,9698889° y una longitud de -100,2751111° a una distancia aproximada de 36 km del Instituto de Ingeniería Civil de Estudios de Posgrado de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

3.6.3.4 Ubicación B4 Moya



Figura 9 Ubicación B4 Moya 25°58'25.6"N 100°17'05.0"W

El Banco 4 Moya al igual que B3 Maqlub (por su cercanía) se encuentra en el Municipio de Salinas Victoria a $25^{\circ}58'25.6''$ N y $100^{\circ}17'05.0''$ W, ubicado en la región del Golfo al Noroeste del estado de Nuevo León localizado con una latitud de $25,9737778^{\circ}$ y una longitud de $-100,2847222^{\circ}$ a una distancia de 37 km aproximadamente del Instituto de Ingeniería Civil de Estudios de Posgrado de la Universidad Autónoma de Nuevo León (Figura 9).

3.6.3.5 Ubicación B5 Cerritos

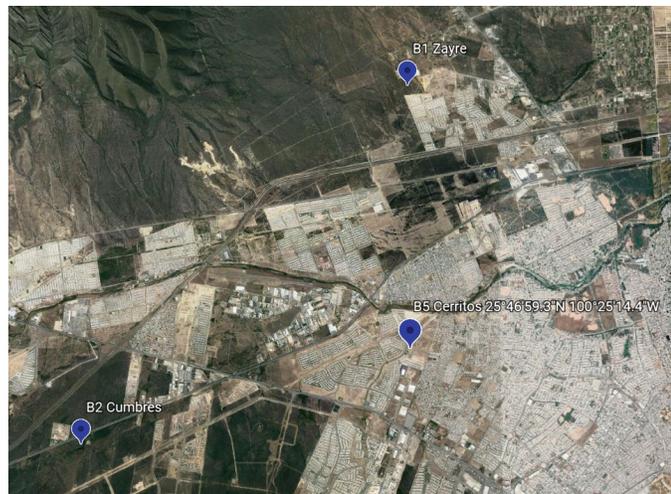


Figura 10 Ubicación B5 Cerritos $25^{\circ}46'59.3''$ N $100^{\circ}25'14.4''$ W

El Banco 5 Cerritos se encuentra a $25^{\circ}46'59.3''$ N $100^{\circ}25'14.4''$ W del estado de Nuevo León (Figura 10) en Villas del Poniente cerca de los bancos B1 Zayre y B2 Cumbres con una latitud de $25,7831389^{\circ}$ y una longitud de $-100,4206667^{\circ}$ a una distancia de 17 km aproximadamente del Instituto de Ingeniería Civil de Estudios de Posgrado de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

3.6.4 Recolección de muestras de los 5 Bancos de suelos

Para la recolección de las muestras de los 5 bancos identificados en el Estado de Nuevo León se acudió a la ubicación proporcionada de cada uno de los bancos, de los cuales se muestrearon conforme la Norma Mexicana NMX-C467-ONNCCE INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN – GEOTECNIA – MATERIALES PARA TERRACERÍAS – METODOS DE MUESTREO, por lo que se tomó una porción representativa de los materiales.

3.6.4.1 Recolección de muestra B1 Zayre



Figura 11 Recolección de porción representativa de B1 Zayre

La recolección de la porción representativa de B1 Zayre (Figura 11) se realizó conforme a la sección 9.3.2 Muestras alteradas representativas de la norma NMX-C467-ONNCCE de la cual se obtuvieron cuatro sacos limpios y secos antes de colocar la muestra para evitar su contaminación con polvo o cualquier otra sustancia y al finalizar se cerró para evitar pérdidas o alteración de su contenido.

3.6.4.2 *Recolección de muestra B2 Cumbres*



Figura 12 Recolección de porción representativa de B2 Cumbres

Al igual que el B1 Zayre la recolección de la porción representativa de B2 Cumbres (Figura 12) se realizó conforme a la sección 9.3.2 Muestras alteradas representativas de la norma NMX-C467-ONNCCE que también se obtuvieron cuatro sacos limpios y secos antes de colocar la muestra para evitar su contaminación con polvo o cualquier otra sustancia y al finalizar se cerró para evitar pérdidas o alteración de su contenido.

3.6.4.3 *Recolección de muestra B3 Maqlub*



Figura 13 Recolección de porción representativa de B3 Maqlub

La recolección de la porción representativa de B3 Maqlub (Figura 13) de igual manera se realizó conforme a la sección 9.3.2 Muestras alteradas representativas de la norma NMX-C467-ONNCCE de la cual se obtuvieron cuatro sacos limpios y secos antes de colocar la muestra para evitar su contaminación con polvo o cualquier otra sustancia y al finalizar se cerró para evitar pérdidas o alteración de su contenido.

3.6.4.4 *Recolección de muestra B4 Moya*



Figura 14 Recolección de porción representativa de B4 Moya

La recolección de la porción representativa de B4 Moya (Figura 14) también se realizó conforme a la sección 9.3.2 Muestras alteradas representativas de la norma NMX-C467-ONNCCE-2013 y de la misma forma se obtuvieron cuatro sacos limpios y secos antes de colocar la muestra para evitar su contaminación con polvo o cualquier otra sustancia y al finalizar se cerró para evitar pérdidas o alteración de su contenido.

3.6.4.5 Recolección de muestra B5 Cerritos



Figura 15 Recolección de porción representativa de B5 Cerritos

La recolección de la porción representativa de B5 Cerritos (Figura 15) de igual manera se realizó conforme a la sección 9.3.2 Muestras alteradas representativas de la norma NMX-C467-ONNCCE-2013 más sin embargo a diferencia de las muestras de los bancos anteriores únicamente se obtuvieron dos sacos limpios y secos antes de colocar la muestra para evitar su contaminación con polvo o cualquier otra sustancia y al finalizar se cerró para evitar pérdidas o alteración de su contenido ya que por caracterización visual este banco presentó altas porciones de gruesos no muy favorables con el suelo buscado para la investigación.

3.6.5 Preparación de muestras para su clasificación

La preparación de las muestras de los 5 bancos identificados en el Estado de Nuevo León (Figura 16) se realizó conforme la Norma Mexicana NMX-C-468-ONNCCE-2013 Industria De La Construcción – Geotecnia – Materiales Para Terracerías – Métodos De Preparación De Muestras, con el fin de preparar las muestras representativas tomadas de los bancos identificados para obtener las porciones representativas para efectuar los

ensayos de laboratorios necesarios, la cual incluye el tendido (se esparce la muestra de suelo en un área determinada), secado (después del tendido se deja el material secar mediante calor natural para disminuir su contenido de agua), disgregado (se aplica presión al material para separar las partículas aglomeradas presentes en la muestra) y el cuarteo de las muestras (se obtienen fracciones representativas de una muestra) para su preparación y acondicionamiento (Figura 17).



Figura 16 Preparación de las muestras representativas, tendido, secado y disgregado



Figura 17 Cuarteo y reducción de las muestras para obtener fracciones representativas

3.6.6 Granulometría de las muestras representativas de los bancos

Para conocer la granulometría de las muestras de los 5 bancos identificados en el Estado de Nuevo León se realizó conforme la Norma Mexicana NMX-C46-ONNCCE-2014 INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN – GEOTECNIA – MATERIALES PARA TERRACERÍAS – DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN GRANULAR, de manera que se utilizó la granulometría completa proponiendo el uso de 13 mallas las cuáles son 3” (7.62 cm), 2” (5.08 cm), 1 ½” (3.81 cm), 1” (2.54 cm), ¾” (1.905 cm), ⅜” (0.9525 cm), N°4 (0.475 cm), N°10 (0.2 cm), N°20 (0.085 cm), N°40 (0.0425), N°60 (0.025 cm), N°100 (0.015 cm) y N°200 (0.0075 cm). En las Figuras 18, 19, 20, 21 y 22 se

puede apreciar la granulometría obtenida tanto de la parte gruesa como de la parte fina para los bancos B1 Zayre, B2 Cumbres, B3 Maqlub, B4 Moya y B5 Cerritos respectivamente.



Figura 18 Granulometría parte gruesa (Izq.) y parte fina (Dcha.) B1 Zayre



Figura 19 Granulometría parte gruesa (Izq.) y parte fina (Dcha.) B2 Cumbres



Figura 20 Granulometría parte gruesa (Izq.) y parte fina (Dcha.) B3 Maqlub



Figura 21 Granulometría parte gruesa (Izq.) y parte fina (Dcha.) B4 Moya



Figura 22 Granulometría parte gruesa (Izq.) y parte fina (Dcha.) B5 Cerritos

3.6.7 Límites de Consistencia o Límites de Atterberg

Para la determinación de los límites de consistencia o límites de Atterberg de las muestras de suelo provenientes de los cinco bancos identificados en el estado de Nuevo León, se empleó el método de ensayo establecido en la Norma Mexicana NMX-C-493-ONNCCE-2018, correspondiente a la industria de la construcción y la geotecnia. El procedimiento consistió en la realización de tres puntos de medición a diferentes contenidos de humedad para la determinación del límite líquido, dos puntos para la determinación del límite plástico y una barra de contracción por cada muestra analizada. Las muestras evaluadas para los límites de Atterberg corresponden a los suelos

identificados como B1 Zayre (Figura 23), B2 Cumbres (Figura 24), B3 Maqlub (Figura 25), B4 Moya (Figura 26) y B5 Cerritos (Figura 27).



Figura 23 Muestras de limite líquido, limite plástico y barra de contracción B1 Zayre



Figura 24 Muestras de Limite de Consistencia B2 Cumbres



Figura 25 Muestras de limite líquido, limite plástico y barra de contracción B3 Maqlub



Figura 26 Muestras de limite líquido, limite plástico y barra de contracción B4 Moya



Figura 27 Muestras de limite líquido, limite plástico y barra de contracción B5 Cerritos

3.6.8 Prueba de compactación dinámica y contenido de agua

Para determinar la masa volumétrica seca máxima, así como el contenido de agua óptimo de las muestras de los 5 bancos identificados en la región noroeste en el Estado de Nuevo León se realizó el Ensayo de Compactación Dinámica Estándar y Modificada conforme la Norma Mexicana NMX-C-476-ONNCCE Industria De La Construcción - Geotecnia - Materiales Para Terracerías - Compactación Dinámica Estándar Y Modificada - Métodos De Ensayo.

3.6.9 Ensayo Valor de soporte de California (CBR)

Para evaluar la calidad de los suelos con base en su resistencia de las muestras de los 5 bancos identificados, se realizó el Ensayo Valor de Soporte de California (CBR) también conocido como valor relativo de soporte (VRS) conforme a lo establecido en la Norma NMX-C-522-ONNCCE-2016 Industria de la Construcción - Geotecnia -

Materiales Téreos - Determinación del Valor Soporte de California de Suelos y Expansión en Laboratorio - Método de Ensayo.

3.6.10 Caracterización de suelos y puzolana por FRX

Para la caracterización por la técnica de Fluorescencia de Rayos X (FRX) se utilizó un equipo PANalytical X-Ray Fluorescence Epsilon 3-XL para analizar las muestras de los 5 bancos de suelos identificados en el Estado de Nuevo León se necesitaron 10g de las muestras en polvo (Figura 28) para mezclar y homogenizar con 1g de cera inerte a manera de homogenizar y ayudar a la aglomeración para formar las pastillas a utilizar para correr el análisis FRX.



Figura 28 Mezclas de 10g de material con 1g de cera inerte

3.6.11 Caracterización de suelos y puzolana por DRX

Para la caracterización de suelos y la puzolana natural por la técnica DRX al igual que la técnica FRX se requirió las muestras en polvo, que se colocaron en el porta muestras de un equipo Malvern PANalytical X-Ray Diffractor Empyrean. En este análisis se emplearon para todas las muestras de los 5 bancos de suelo las siguientes condiciones [94–96]:

- Angular Range (2θ): $2^\circ - 95^\circ$
- Step Size (2θ): 0.02°
- Scan Time per-Step: 0.5s

3.7 Desarrollo de la etapa 2: Selección de suelos

Para el desarrollo de esta etapa se aborda el proceso selección de los suelos más adecuados para la investigación, en la cual se consideraron sus propiedades, la recolección y preparación de muestras de los bancos seleccionados, así como la comparativa con la muestra inicial para garantizar el uso del mismo banco/material.

3.7.1 Recolección de los bancos seleccionados

Al igual que en la sección 3. “Recolección de Muestras de los 5 bancos de suelos”, y siguiendo el mismo procedimiento se comenzó la nueva recolección de los bancos (1 Tonelada en total, $\frac{1}{2}$ Tonelada por cada banco aproximadamente) B1 Zayre y B3 Maqlub ahora B1Z y B3M respectivamente, para realizar una comparación de sus propiedades físicas (granulometría, consistencia y densidad) para verificar que se está tomando material de la misma veta y que no presenta alteraciones importantes e incongruentes con los ensayos realizados anteriormente durante la clasificación y selección de suelos para la realización de la investigación.

3.8 Desarrollo de la Etapa 3: Evaluación de las dosificaciones

Cómo parte de la evaluación de dosificaciones se analizará el proceso de determinación y ajuste de las proporciones óptimas de los materiales que componen la mezcla de suelo y estabilizante. Una correcta dosificación es clave para lograr un

equilibrio adecuado entre los materiales. En esta etapa, se explora la evaluación de las dosificaciones.

3.8.1 Evaluación de las dosificaciones monitoreo de pH y CE

Para la etapa 3 se plantea la evaluación de las dosificaciones, se midieron el pH y la CE. La evaluación de la reactividad tiene como objetivo estimar el contenido inicial de estabilizante requerido por el suelo para la reactividad puzolánica (principio de Eades & Grimm [91]). Asimismo, se monitoreó la tasa de consumo de dicho estabilizante durante el tiempo de curado. Lo anterior se evalúa a partir de la evolución del pH y la CE en las soluciones de mezcla. Para ello:

1. Se pesaron 5 g de material de suelo y diferentes porcentajes del estabilizante propuesto (ANP o Cal) con 2.5%, 5%, 7.5%, y 10% del peso del suelo. Estos se complementaron con 100 ml de agua destilada para las soluciones de mezcla. Las soluciones de mezcla se curaron en botellas herméticamente cerradas de 1 a 90 días a $40 \pm 2^\circ \text{C}$. El pH y la CE se midieron a diferentes tiempos de curado utilizando un pH Conductivity DO Meter T-730, inicialmente a 1 hora y a los 3, 7, 14, 21, 28 y 90 días. La activación de la puzolana natural se realizó mediante la incorporación de un 10% de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y un 4% de sulfato de sodio (Na_2SO_4), en relación con la masa seca del material (Tabla 7).
2. Se elaboraron cubos estabilizados con el 2.5%, 5%, 7.5% y 10%, se mezclan el suelo y el estabilizante en seco hasta tener una distribución homogénea, y se agrega la cantidad de agua óptima determinada según la prueba Proctor + 0.5 relación a/c del estabilizante. Los cubos se curaron hasta 90 días en horno a $40 \pm 2^\circ \text{C}$.

Tabla 7 Diseño de mezclas para determinar el porcentaje de estabilizante y la reactividad de los materiales

| Soil | Stabilizer | |
|------------|------------|---|
| | Lime | Activated natural pozzolan (ANP) Natural Pozzolan + 10% Ca(OH) ₂ + 4% Na ₂ SO ₄ |
| B1Z | - | - |
| | 2.5% | - |
| | 5% | - |
| | 7.5% | - |
| | 10% | - |
| | - | 2.5% |
| | - | 5% |
| | - | 7.5% |
| B3M | - | 10% |
| | 2.5% | - |
| | 5% | - |
| | 7.5% | - |
| | 10% | - |
| | - | 2.5% |
| | - | 5% |
| | - | 7.5% |
| - | 10% | |

En la figura 29 se presenta la toma de muestras de las botellas ya pesadas con los 5 gr. de material de los distintos porcentajes de estabilizantes con el 2.5%, 5%, 7.5% y 10% para el monitoreo de su pH y CE, en la Figura 30 se muestran las botellas con soluciones curadas en horno a $40 \pm 2^\circ \text{C}$ y en la Figura 31 la diferencia de reacción de las botellas con solución de cal y solución con la puzolana activada alcalinamente, donde la solución con puzolana ya se encuentra solidificada con apenas 1 día de curado.



Figura 29 Botellas con solución para la medición y monitoreo de pH y CE



Figura 30 Botellas con soluciones en proceso de curado en horno



Figura 31 Botella con soluciones con puzolana (Izq.) y Cal (Dcha.) a un día de reacción

3.8.2 Comparativa de CE y calorimetrías

Para comparar CE-Calorimetrías se realizó una serie de 30 experimentos, 15 con el suelo B1Z y 15 con B3M para relacionar el incremento de la CE con el incremento de energía por calorimetría conforme a lo establecido en la Tabla 7. Para ello se utilizó un equipo CALMETRIX I-Cal 4000 HPC, este calorímetro es de alto rendimiento y cumple con la norma ASTM C1702 (prueba de calor de hidratación) y con la ASTM C1679 (calorimetría isotérmica).

Para el análisis de comparación, se pesaron 50 gramos de material (independientemente del sistema) y 50 gramos de agua. El equipo se estabilizó durante 24 horas y posteriormente se añadieron los 50 gramos de agua e igualmente se dejó estabilizar la temperatura durante 2 horas, y transcurrido ese tiempo se agregaron los materiales restantes de los sistemas según la Tabla 8 para B1Z y B3M.

Tabla 8 Tabla de comparativas para calorimetría y CE B1Z y B3M

| No. | Tipo de suelo | Estabilizante Cal | Puzolana Natural | Activador Sulfato de sodio |
|-----|---------------|-------------------|------------------|----------------------------|
| 1 | B1Z | 10% | - | - |
| 2 | B1Z | - | - | 4% |
| 3 | - | 10% | 10% | - |
| 4 | - | - | 10% | 4% |
| 5 | B1Z | 10% | 10% | |
| 6 | B1Z | | 10% | 4% |
| 7 | B1Z | 10% | 10% | 4% |
| 8 | B1Z | - | - | - |
| 9 | - | - | Puzolana | - |
| 10 | - | Cal | - | - |
| 11 | - | - | - | Sulfato de sodio |
| 12 | B1Z | - | 10% | - |
| 13 | B1Z | 10% | - | 4% |
| 14 | - | 10% | 10% | 4% |
| 15 | - | 10% | - | 4% |
| 16 | B3M | 10% | - | - |
| 17 | B3M | - | - | 4% |
| 18 | B3M | 10% | 10% | |
| 19 | B3M | | 10% | 4% |
| 20 | B3M | 10% | 10% | 4% |
| 21 | B3M | - | - | - |
| 22 | B3M | - | 10% | - |
| 23 | B3M | 10% | - | 4% |

3.9 Desarrollo de la Etapa 4: Resistencia a compresión y durabilidad de los suelos estabilizados

En esta etapa se abordarán los métodos y ensayos utilizados para evaluar la capacidad de los suelos estabilizados para soportar cargas y deformaciones, así como su resistencia a factores de degradación en determinado tiempo específicamente con agua como principal agente. Esta etapa es crucial para garantizar que los suelos tratados mantengan su integridad y funcionalidad bajo diferentes condiciones, asegurando la estabilidad y longevidad de los especímenes.

3.9.1 Fabricación de cubos 5 x 5 cm

Para fabricar los especímenes cúbicos de 5 x 5 cm se diseñó un molde prensa basado en la prensa CINVA RAM, en la Figura 32 se muestra el molde de diseño propio con el cuál se elaboraron todos los cubos tanto naturales como estabilizados con cal y puzolana, en el cuál durante el proceso de elaboración de los cubos se realizó conforme a la densidad obtenida del Ensayo de Compactación Dinámica Estándar y Modificada en el cual se obtuvo la densidad máxima que pueden alcanzar las muestras de suelos para su correcta compactación a su correcta condición de humedad, de manera que se cuantificó y se pesó la cantidad de material necesario para llegar a la densidad de cada uno de los cubos de 5x5cm con relación a este ensayo y ensamblando un tope en el brazo de compactación del molde diseñado para no comprimir de más cada espécimen y garantizando la misma densidad y las mismas dimensiones para cada uno de estos.

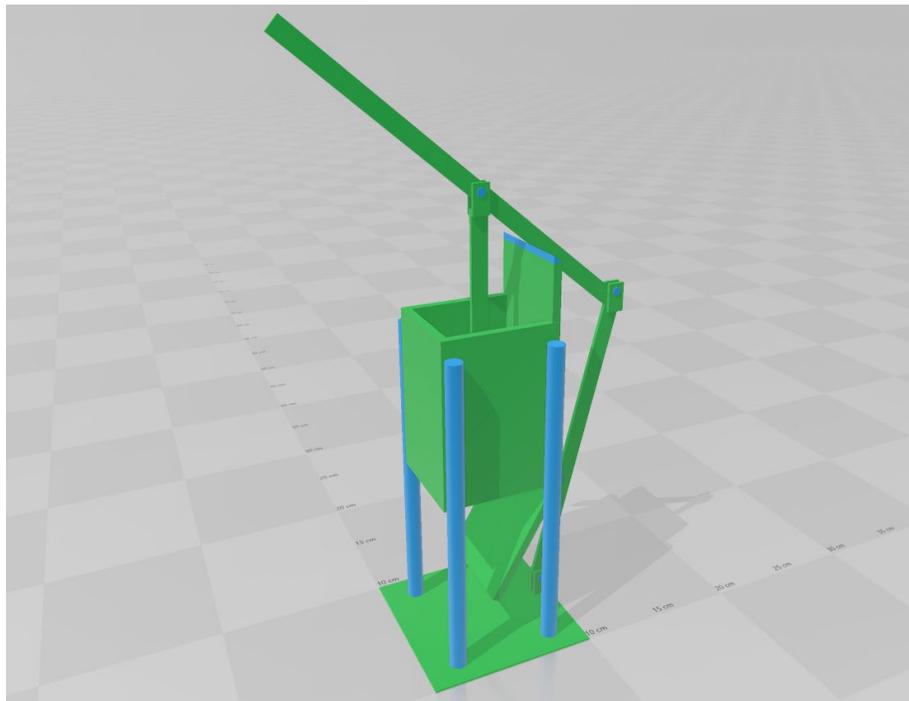


Figura 32 Molde de diseño propio para la elaboración de cubos 5x5 cm

3.9.2 Resistencia a la compresión

Se procedió a realizar el ensayo a compresión de los cubos de B1Z y B3M naturales y estabilizados con los distintos porcentajes tanto de Cal como de Puzolana activada conforme la norma NMX-C-508-ONNCCE-2015 INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN - BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA ESTABILIZADOS CON CAL - ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE ENSAYO en la cual se hace referencia a la norma NMX-C-036-ONNCCE Industria de la construcción - Mampostería - Resistencia a la compresión de bloques, tabiques o ladrillos, tabicones y adoquines - Método de ensayo (Figura 33).



Figura 33 Ensayo a compresión de cubos 5 x 5 cm

3.9.3 Durabilidad de los suelos estabilizados

Posteriormente se procedió a realizar los ensayos de durabilidad tanto de los cubos naturales como de los estabilizados con cal y los estabilizados con PA de B1Z y B3M.

3.9.3.1 Resistencia a ciclos de humedecimiento/secado

De acuerdo con la norma NMX-C-508 [9] se deben ensayar a resistencia a ciclos de humedecimiento/secado todos los cubos naturales y estabilizados previamente a cualquier ensayo de erosión. En este ensayo se debe verificar que tras seis ciclos de humedecimiento/secado no se observe ninguna de las condiciones siguientes:

- Modelo de grietas aleatorio.
- Modelo de grietas en estrella.
- Hinchamiento local.
- Picado local en al menos 5 zonas.
- Penetración de agua en más del 70% del ancho del BTC (visualmente por el exterior).
- Pérdida de fragmentos mayores a 50 mm, excepto los que provengan de la parte comprendida de los bordes y 50 mm hacia adentro.
- Erupciones (Eflorescencias) en la superficie.

3.9.3.2 Ensayo de erosión por goteo

El ensayo de erosión por goteo o también denominado método Geelong, consiste en liberar 100ml de agua a través de un paño o esponja de aproximadamente 16 mm de ancho, y de longitud de 20 a 60 mm, a una distancia de caída de 400 mm hasta la muestra, la cual se encontrará inclinada a 27° . Posteriormente se medirá la profundidad del hoyo

formado por medio de una varilla de 3 mm de diámetro, el esquema del ensayo se muestra en la Figura 34.

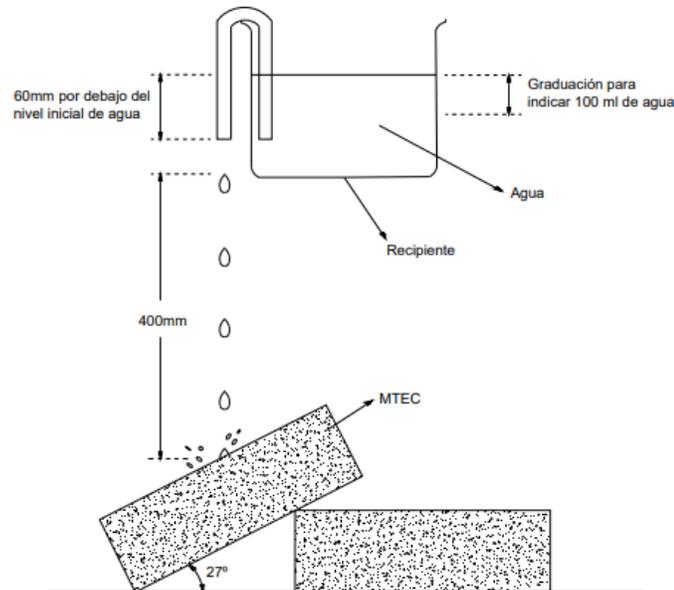


Figura 34 Esquema de ensayo de erosión por goteo, dimensiones en mm

3.9.3.3 Ensayo de erosión acelerada

El ensayo de erosión acelerada o también conocido como SAET (Figura 35) consiste en liberar una corriente de agua durante 10 min a través de un tubo de 5 mm de diámetro interior, desde un depósito que mantiene su nivel de forma constante a 1500 mm de altura hasta el espécimen, que se encuentra inclinado de igual forma a 27°. La profundidad de la oquedad se medirá con una varilla de 3 mm de diámetro. Se pueden utilizar los criterios de erosión por goteo o bien se puede tomar un parámetro de profundidad de oquedad (D) que se encuentre entre 0-10 mm como "Apto", mientras que si la profundidad supera los 10 mm se puede considerar "No apto".

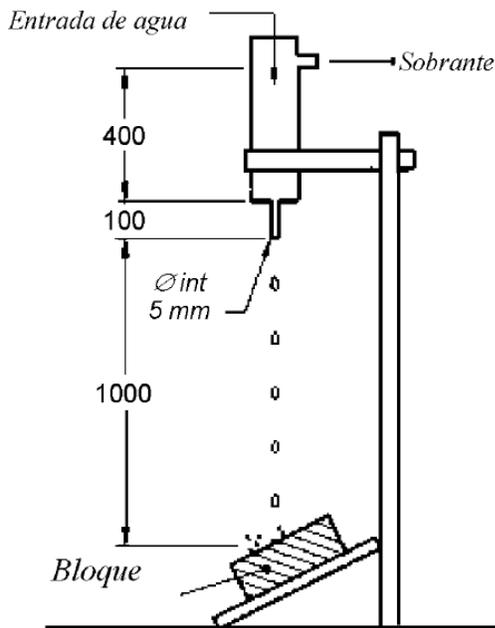


Figura 35 Esquema de ensayo de erosión acelerada, dimensiones en mm

3.9.3.4 Ensayo por inmersión total

El ensayo de absorción de agua por inmersión total consiste en secar los especímenes hasta masa constante, para posteriormente introducirlos dentro de un recipiente que permita su inmersión total, y dejar las muestras sumergidas a temperatura ambiente durante 24 horas, para posteriormente retirar el agua superficial y finalmente pesar las muestras y conocer su masa saturada.

El cálculo del valor de absorción de la muestra se calcula con la siguiente ecuación:

$$W_s(\%) = \frac{M_s - M_d}{M_d} \times 100 \quad (1)$$

Dónde:

M_d , es la masa de la probeta después del secado (g)

M_s , es la masa de la probeta después de la inmersión (g)

W_s , es el porcentaje de absorción de agua de la probeta (%)

3.10 Desarrollo de la Etapa 5: Análisis eMergético

Para el punto 1 de la Etapa 5 referente al análisis eMergético, se procedió a la diagramación de los sistemas de suelo estabilizado con cal y suelo estabilizado con PA por medio del software EmSim: eMergy Simulator © 2003-2022, haciendo uso de la simbología propuesta por H. T. Odum. El programa EmSim es una implementación informática de los principales conceptos de los Sistemas de Energía de Odum, lenguaje conocido como el Lenguaje del Circuito de Energía. El software EmSim ofrece todas las características estándar del editor de diagramas, transformación del sistema en conjunto de ecuaciones diferenciales, integración de ellas, trazado de resultados y cálculo de eMergías y transformaciones.

Posteriormente para el punto 2, se realizó la elaboración de las tablas de análisis de eMergía basada en los diagramas creados en el punto 1. Para dicha elaboración se tomaron transformidades propuestas y calculadas por H. T. Odum, que se encuentran en el apéndice C del libro “Environmental Accounting: Energy and Environmental Decision Making” [97].

Para el punto 3, se calcularon los índices haciendo uso de las tablas de análisis de eMergía elaboradas en el punto anterior. Y por último para el punto 4 se realizó la interpretación y comparación de los índices calculados.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados de la Etapa 1: Caracterización de los materiales

Para este punto, se presenta el proceso de caracterización y clasificación de los suelos. Los resultados de esta etapa son fundamentales, ya que permiten comprender las características esenciales y el comportamiento de estos.

4.1.1 Comparación granulométrica con Normas UNE y NTC

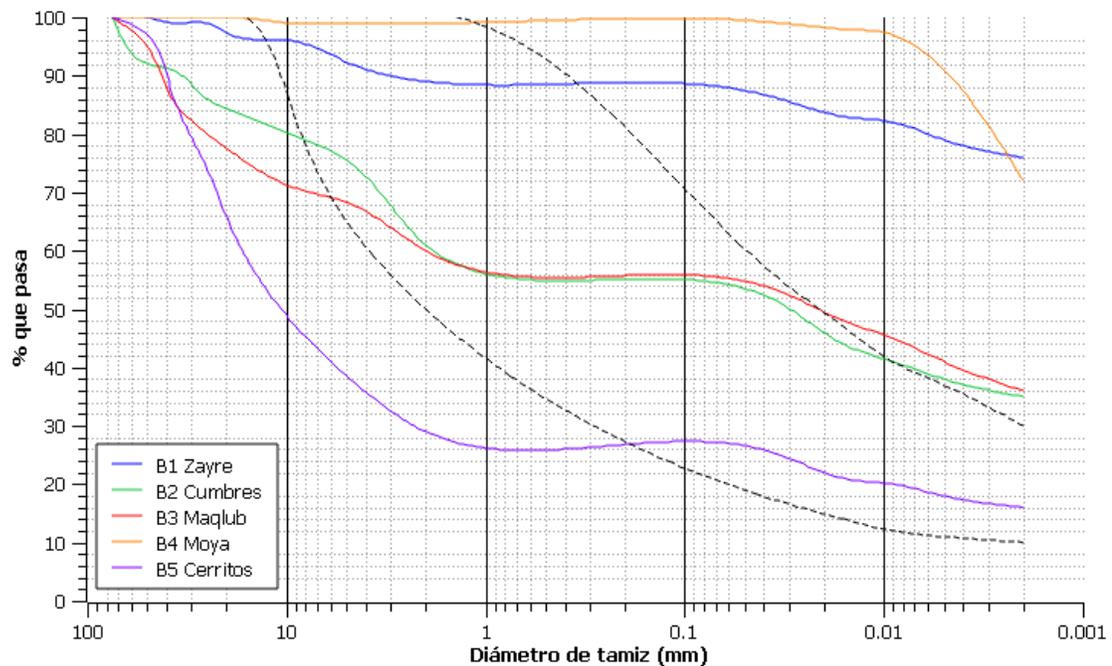


Figura 36 Comparativa granulométrica de los 5 bancos de suelos UNE-41410 y NTC-5324

En la Figura 36 conforme a los criterios establecidos se muestra la comparación de las granulometrías de los 5 bancos de suelo con las normas españolas y colombianas con la región punteada propuesta en dichas normas como la granulometría ideal de los suelos (tamaño máximo de agregado 19mm y del 10-30% de finos). Donde se aprecia que los únicos bancos que se asemejan a la región planteada son B2 Cumbres y B3 Maqlub

siendo el banco B2 Cumbres el de mayor concentración de arenas con 39% seguido del banco B3 Maqlub con 32% el cual se muestra con el mismo porcentaje en gravas presentando una granulometría muy uniforme de partículas boleadas dominando de manera leve su concentración de finos con 36%, y que desde esta primera etapa de la guía de caracterización se empiezan a descartar los bancos B1 Zayre que está ligeramente por encima de los parámetros establecidos debido a su alta concentración de finos 76%, B4 Moya que por su excesivo contenido de finos está muy por encima de esta región con 72% pero más que todo a la ausencia de gravas con apenas el 1% y B5 Cerritos que en caso contrario está muy por debajo de la región por la gran cantidad de partículas gruesas presentes en este banco con 62%.

Para la puzolana natural en la Figura 37 se observa una distribución homogénea y bien ordenada con un SDg de 26.97, en la cual, la molienda de 60 min alcanzó un tamaño de partícula similar al del cemento con un D50 de 20.09 μ m.

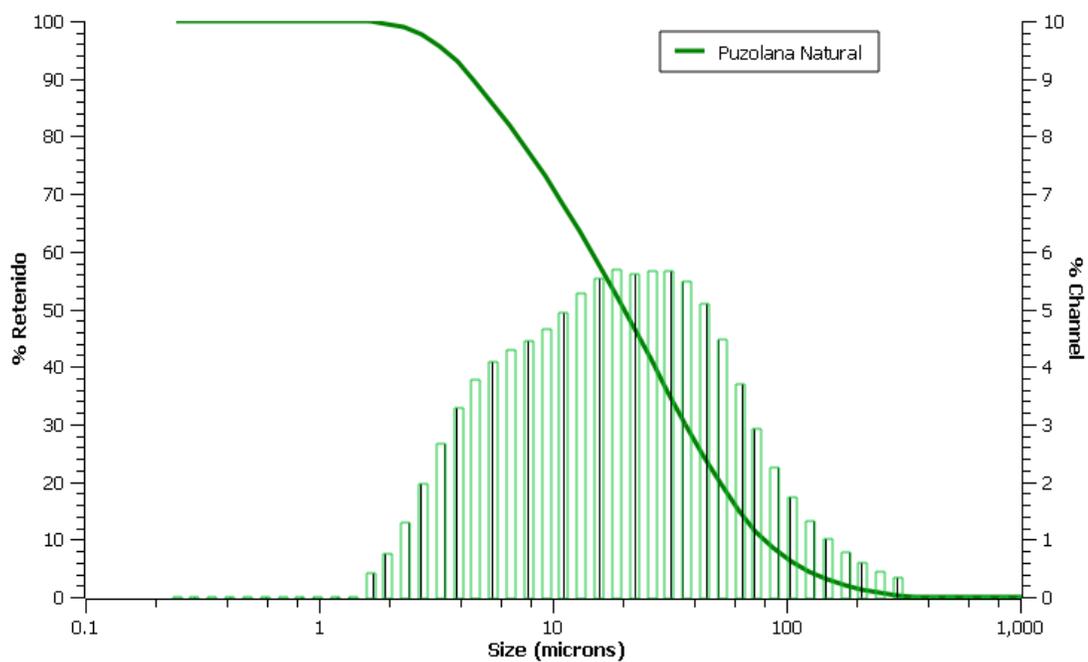


Figura 37 DTP Puzolana Natural

4.1.2 Comparativa de los límites de consistencia con Normas UNE y NTC

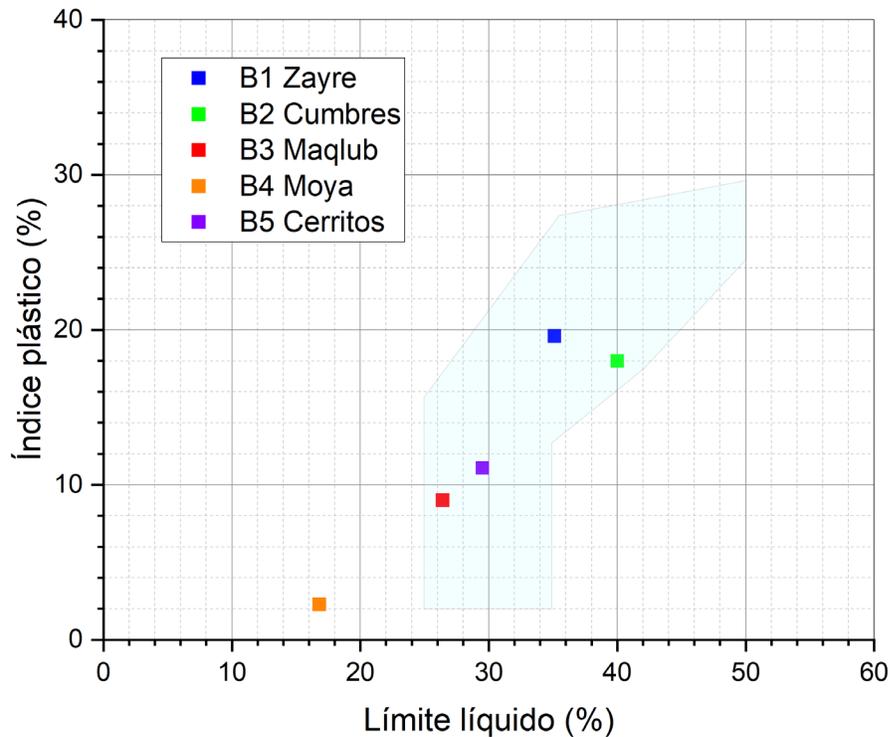


Figura 38 Comparativa de plasticidad de los 5 bancos de suelos UNE-41410 y NTC-5324

Para conocer los límites de consistencia o límites de Atterberg de las muestras de los 5 bancos identificados en el Estado de Nuevo León se realizó conforme la Norma Mexicana NMX-C-493-ONNCCE Industria De La Construcción – Geotecnia – Límites De Consistencia De Suelos – Método De Ensayo, de manera que se realizaron 3 puntos a distintas humedades para el límite líquido, 2 puntos para el límite plástico y una barra de contracción por cada muestra de suelo (Figura 38) y que al igual que el ensayo granulométrico se realizó la comparación de los 5 bancos de suelo con las normas españolas UNE-41410 y las colombianas NTC-5324 donde se muestra una región sombreada que relaciona el porcentaje del Límite Líquido de cada una de las muestras de

suelo con el Índice Plástico (Diferencia entre Limite Líquido y el Limite Plástico) como se muestra en la Figura 38, donde se descarta el B4 Moya al tener consistencia de Limo (que por sí solo no tiene un correcto o un buen comportamiento y es necesario estabilizarlo) en la carta de plasticidad, se encuentra totalmente fuera de esta región sombreada marcada como la ideal al considerar a las arcillas (materiales que tienden a tener una reacción puzolánica y pueden aprovechar la cohesión de sus partículas por sí solos o al ser estabilizados con cal) de baja o alta plasticidad.

4.1.3 Comparación y análisis de resultados FRX

Como se mencionó anteriormente, aunque los aspectos físicos de los suelos son parámetros importantes, no son suficientes para seleccionar un suelo ideal para las técnicas de construcción con tierra, por lo que también se efectúan análisis de FRX y DRX, para complementar la información de caracterización con aspectos químicos y mineralógicos de los 5 bancos de suelos recolectados.

Para la comparación y el análisis de resultados de FRX de los 5 bancos de suelos y para una mejor lectura de los resultados, se eliminaron los compuestos con contenido en PPM (partes por millón) y dejando únicamente los compuestos que presentaran un porcentaje significativo en los que la suma de todos estuviera por encima del 99% del porcentaje total de los bancos analizados tal y como se muestra en la Tabla 9 Comparación y suma de porcentajes de los bancos de materiales.

Tabla 9 Comparación y suma de porcentajes de los bancos de materiales

| Elemento | B1 Zayre | B2 Cumbres | B3 Maclub | B4 Moya | B5 Cerritos |
|----------|----------|------------|-----------|---------|-------------|
| Na | | | | 4.454% | |
| Mg | 0.822% | 0.635% | 0.805% | 0.773% | 0.708% |

| | | | | | |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Al | 6.585% | 6.876% | 5.654% | 6.389% | 3.778% |
| Si | 67.769% | 73.528% | 66.908% | 74.975% | 40.146% |
| K | 1.133% | 1.489% | 1.193% | 1.101% | 0.985% |
| Ca | 20.752% | 14.026% | 22.575% | 9.780% | 52.159% |
| Ti | 0.371% | 0.396% | 0.340% | 0.370% | 0.266% |
| Fe | 2.357% | 2.823% | 2.024% | 1.894% | 1.576% |
| Total: | 99.789% | 99.773% | 99.806% | 99.736% | 99.879% |

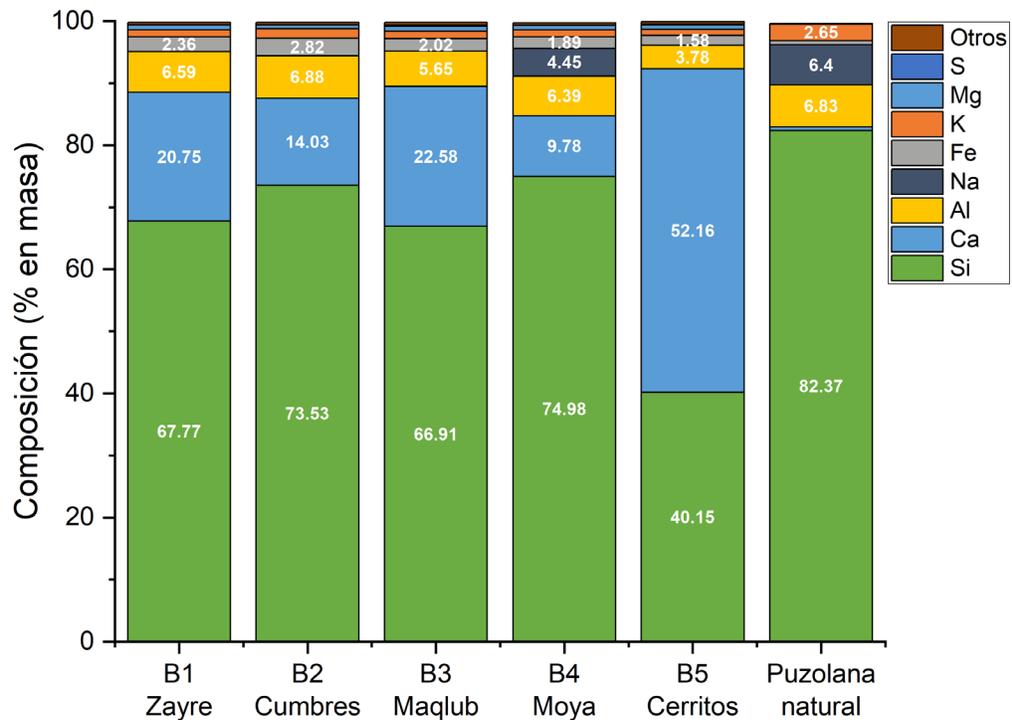


Figura 39 Gráfica de comparación FRX

De igual manera para una mejor lectura de los datos se elaboró la Gráfica de comparación FRX (Figura 39) donde se muestran los porcentajes del contenido de compuestos y elementos que conforman los bancos de suelo donde se puede apreciar que los bancos B1 Zayre, B2 Cumbres, B3 Maqlub y B4 Moya son muy similares y se podría decir por la apreciación de la gráfica que son base silicio ya que están conformados por

más del 50% de Si, de los cuales los bancos B4 Moya y B2 Cumbres tienen los contenidos más altos con 74.98% y 73.53% respectivamente, seguido de los bancos B1 Zayre con 67.77% y B3 Maqlub con 66.91%, donde el banco B5 Cerritos tuvo una concentración muy diferente pues apenas registró 40.15% de Si de su contenido total, pero registrando el contenido más alto de Ca con 52.16%, seguido de B3 Maqlub, B1 Zayre, B2 Cumbres con 22.58%, 20.75% y 14.03% respectivamente siendo B4 Moya el de menor contenido de Ca con 9.78% pero siendo el único que registró Na con 4.45%, que de igual manera con contenidos por debajo del 10% se encuentran Al y Fe donde B2 Cumbres registró los contenidos más altos con 6.88% y 2.82% respectivamente, seguido de B1 Zayre con 6.59% y 2.36%, B4 Moya con 6.39% y 1.89%, y B3 Maqlub con 5.65% y 2.02% y por último siendo B5 Cerritos el que registró los contenidos más bajos con apenas 3.78% de Al y 1.58% de Fe de su contenido total. La puzolana natural tuvo la mayor concentración de Si con el 79.78% además de 6.83% de Al, con la cual se espera aporte sílice y alúmina reactivas seguido de 6.40% de Na y 2.65% de K.

4.1.4 Comparación y análisis de resultados DRX

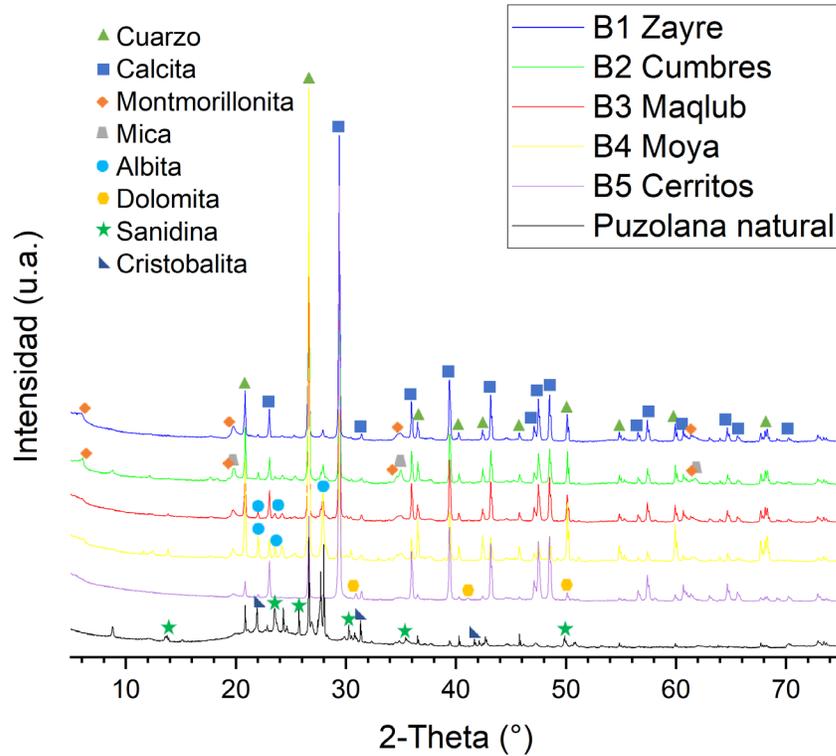


Figura 40 Comparación de Difractogramas de los 5 Bancos de Suelos y sus compuestos principales

Con el objetivo de realizar un análisis comparativo de los resultados de Difracción de Rayos X (DRX) de los cinco bancos de suelos recolectados en la región noroeste del estado de Nuevo León y mejorar su interpretación, se unificaron los Difractogramas individuales presentados en las Figuras 87, 88, 89, 90 y 91 del anexo en una única representación consolidada (Figura 40). En esta figura se muestra la comparación de los Difractogramas de los cinco bancos de suelos, lo que permite identificar y contrastar sus fases cristalinas y compuestos minerales predominantes, siendo las fases minerales principales Cuarzo (Código de referencia: 01-070-3755) y Calcita (01-076-2712) con los picos predominantes del análisis, difractándose con mayor intensidad aproximadamente a

26° y 29° 2 θ DEG respectivamente, pero dónde se empiezan a diferenciar los bancos B1 Zayre y B2 Cumbres es que muestran presencia de picos de Montmorillonita (5.72°, 19.82°, 35.07° and 67.93° 2 θ , 00-058-2007), el cuál es un mineral del grupo de los silicatos, subgrupo de los filosilicatos pertenecientes a las arcillas, siendo considerada un tipo de arcilla expansiva ya que en presencia de agua tiende a dilatarse y en su ausencia a contraerse, y esto se aprecia en los límites de contracción donde B1 Zayre y B2 Cumbres tuvieron los porcentajes más altos con el 10.9% y el 7.6% respectivamente por lo que no son ideales para las técnicas de construcción con tierra y con gran diferencia a B3 Maqlub y B4 Moya, los cuales presentan fases de Albita (22.03°, 24.27° and 27.91° 2 θ ; 01-070-3752) que al igual son parte del grupo de los silicatos pero subgrupo de los tectosilicatos perteneciente a los feldespatos en los cuales no hubo gran contracción al igual que el B5 Cerritos que como se apreció en la comparativa de FRX tuvo el porcentaje más alto de Ca y por lo mismo mostró picos de Dolomita (30.91°, 41.11° and 51° 2 θ ; 01-073-2361), mineral compuesto de carbonato de calcio y magnesio (CaMg(CO₃)₂). La puzolana natural muestra la presencia de Sanidina (01-083-1657) y Cristobalita (01-071-6244) con picos principales a los 26.92° y 21.91° respectivamente, siendo estos muy comunes en rocas volcánicas félsicas, por lo que la puzolana natural se considera como una arena volcánica. Además, la loma que se aprecia entre los 20 y 30°, se conoce como un halo amorfo, esto sería un indicativo de una alta capacidad de reacción por parte de la puzolana natural, a diferencia de la ausencia de este en los 5 bancos de suelos [98,99].

4.2 Resultados de la Etapa 2: Selección de suelos

Cómo parte de la etapa 2, se expondrán los resultados obtenidos durante el proceso de análisis para la selección de los suelos más adecuados para la investigación y la puzolana a natural utilizada. Se detallarán las propiedades físicas y químicas de los suelos evaluados, así como los criterios técnicos que guiaron su selección, además de las normativas utilizadas para su comparación. Estos resultados son clave, ya que permiten determinar qué suelos cumplen con los requisitos necesarios para las condiciones de la investigación. Además, se analizará cómo estos resultados influyen en las etapas siguientes del desarrollo.

4.2.1 Selección de B1 Zayre y B3 Maqlub

De todos los ensayos de caracterización realizados a las muestras recolectadas de los 5 bancos de suelo para elegir al candidato ideal para fabricar BTC Bloques de Tierra comprimida como técnica de construcción con tierra se postulan el banco B1 Zayre y B3 Maqlub como los mejores candidatos, esto debido a que en un principio de la investigación se pretendían encontrar bancos con mayor concentración de finos y que estos bancos en su clasificación SUCS provista por su concentración granulométrica y los límites de consistencia son los únicos que se perfilan como arcillas, ya que el banco B4 Moya aunque tuvo mayor concentración de finos su consistencia fue de Limo (Figura 70), B2 Cumbres se clasificó como arena y B5 Cerritos como grava (Ver Anexos K y N respectivamente), por lo que estos bancos se descartan como opción directa, además siendo B1 Zayre y B3 Maqlub los que presentaron contenidos muy similares en el análisis FRX, sin embargo, en los ensayos AASHTO y CBR el banco B3 Maqlub adquiere cierta ventaja pues presenta cualidades para ser utilizado no solo como material para BTC, sino también como material

calidad subrasante teniendo mayor soporte que B1 Zayre que al tener un menor porcentaje en CBR se cataloga como terraplén. Otra parte importante es la obtención de la materia prima, donde B3 Maqlub toma ventaja ante todos los bancos, ya que cuenta con un mejor acceso y una veta más estable que garantiza a simple vista una materia prima consistente para futuras recolecciones, sin embargo, se seleccionaron ambos bancos B1 Zayre (B1Z) y B3 Maqlub (B3M) con el propósito de poder comparar el comportamiento de estos bancos después de ser estabilizados con puzolanas naturales activadas alcalinamente.

4.3 Resultados de la Etapa 3: Evaluación de las dosificaciones

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la determinación de las proporciones óptimas de los materiales utilizados en la mezcla, con el fin de asegurar un rendimiento adecuado en términos de resistencia y durabilidad. Se analizan los ensayos realizados por medio del monitoreo del pH y CE, así como una comparativa con calorimetría para validar las dosificaciones propuestas. Los resultados de esta etapa son esenciales para optimizar el uso de los recursos obteniendo el mejor aprovechamiento de estos y entender su comportamiento.

4.3.1 Monitoreo de pH y CE

En la Figura 41 se muestra la evolución y el monitoreo de la conductividad eléctrica (CE) de las soluciones de mezcla de los suelos B1Z y B3M estabilizados con distintos porcentajes de cal y puzolana activada (PA). En ambos suelos se observa una diferencia bastante significativa en el aumento de la CE de las muestras estabilizadas con PA, teniendo mayor CE que las estabilizadas con cal desde la medición inicial a 1hr estando por encima de los 6.00 mS/cm con apenas el 2.5% de adición de PA, a diferencia de los 3.00 mS/cm alcanzados con las mezclas del 10% de adición de cal, que para ambos

casos después de un día de curado en horno a $40 \pm 2^\circ \text{C}$ alcanzaron su pico máximo de reacción llegando cerca de los 9.00 mS/cm para los estabilizados con PA y por debajo de los 5.00 mS/cm para los estabilizados con Cal. Al tercer día de curado ambos sistemas y en ambos suelos tuvieron una reducción importante de la CE y en algunos casos como B3M con el 2.5% de PA alcanzando valores de CE inferiores de los obtenidos en la medición inicial a 1hr y posteriormente, teniendo una reducción más gradual a los 7, 14 y 28 días de curado, sin embargo en algunos casos como el de B1Z con el 5 y 7.5% de PA de 7 a 14 días no hubo una disminución significativa, apreciándose casi de forma lineal, siendo hasta los 21 días cuando se registró un decremento y nuevamente no teniendo cambios abruptos a los 28 días. Para ambos suelos estabilizados con cal, entre mayor fue el porcentaje adicionado mayor fue su CE y registrando disminuciones paulatinas conforme iban transcurriendo los días. La disminución de la CE se debe al consumo de Ca_2+ y OH^- durante la reacción puzolánica de los materiales arcillosos, y la CE mínima alcanzada o el comportamiento lineal de la CE en los diferentes porcentajes tanto de PA como de CAL podrían indicar el final del consumo de Ca_2+ y la madurez óptima o el final de la reacción puzolánica de los sistemas en ambos suelos, y con esto la formación de compuestos con propiedades cementantes como los C-S-H (silicatos de calcio hidratados) y C-A-H (hidratos de aluminato de calcio), e inclusive compuestos de N-A-S-H (Silicoaluminato Alcalino Hidratado) y C-(N,A)-S-H (Silicatos de Calcio Hidratado (procedentes del gel C-S-H) que incorporan aluminio y sodio en su composición) los cuales poseen propiedades cementantes [100–102]. En cuanto al pH de las soluciones en ambos suelos (B1Z y B3M) estabilizados con Cal se mantuvieron por encima de 11.5 a partir del 5% de adición y con el 7.5% por encima de 12 al igual que los estabilizados con

PA durante las mediciones iniciales de 1hr indicando según Eades & Grimm siendo el 7.5% el mínimo requerido para su estabilización elevando el pH y generando el ambiente alcalino necesario para el intercambio catiónico y la reacción puzolánica. Por esta razón se descartó elaborar muestras para la etapa experimental de propiedades mecánicas y durabilidad con el 2.5% de cal y PA, al estar por debajo de los valores tanto de pH como CE.

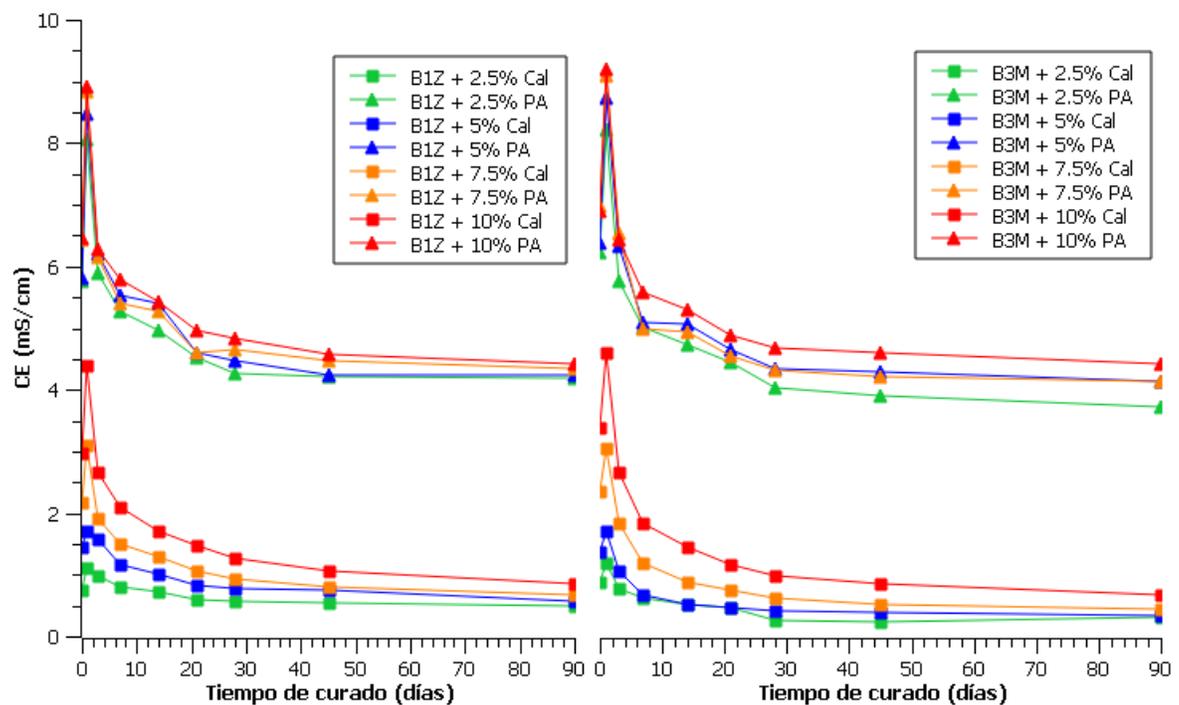


Figura 41 Evolución y monitoreo de CE en soluciones de mezcla BIZ (Izq.) y B3M (Dcha.)

4.3.2 Comparativa de Calorimetrías y CE

De las mediciones realizadas tanto para CE como para calorimetría de los sistemas hay una alta relación entre ellos, ya que entre mayor CE entre los materiales presentes mayor calor liberado. Dónde la conductividad eléctrica de las soluciones preparadas depende de la cantidad de iones presentes en ella y de su capacidad para moverse a través de la solución para poder reaccionar con otros elementos, una alta CE está relacionada con

la disolución y liberación de los iones presentes en los materiales para así poder reaccionar con otros, por lo anterior a medida que avanza el tiempo estos se consumen (reaccionan) y disminuye la CE. Por su parte, la calorimetría mide el calor generado por la hidratación temprana de los materiales y la velocidad a la que esta ocurre, donde el momento y la forma de las curvas de temperatura o calor obtenidas a través de la calorimetría es un indicador del rendimiento de las mezclas y de las posibles interacciones entre los materiales utilizados.

De los sistemas propuestos de la Tabla 8 tanto para B1Z como para B3M se observaron resultados similares tanto para CE como para calorimetría, sin embargo, se destacan algunas diferencias claves para B1Z (No. 1 al 4). Donde en la Figura 42 se puede observar que independientemente del tipo de activador para la puzolana natural o estabilizante para el suelo, la puzolana natural siempre se mantuvo por encima del suelo tanto para CE como para el calor liberado, esto podría indicar mayor reactividad y confirmaría sus características como material reactivo, sin embargo en cuanto la energía térmica, se aprecia que el suelo (B1Z) comienza por encima de la puzolana, esto se debe a la presencia de montmorillonita, ya que este tipo de arcillas tienen un alto intercambio catiónico [103,104]. Sin embargo, en el transcurso del tiempo se empieza a ver que la puzolana se llega a acercar y finalmente supera este parámetro, debido a su característica reacción puzolánica que suele ser más lenta. También se puede observar que la puzolana natural reacciona mejor con el sulfato de sodio que con el hidróxido de calcio, esto podría indicar una activación alcalina, a diferencia del suelo que reacciona mejor con la cal que con el sulfato de sodio, por una reacción puzolánica o intercambio catiónico [105].

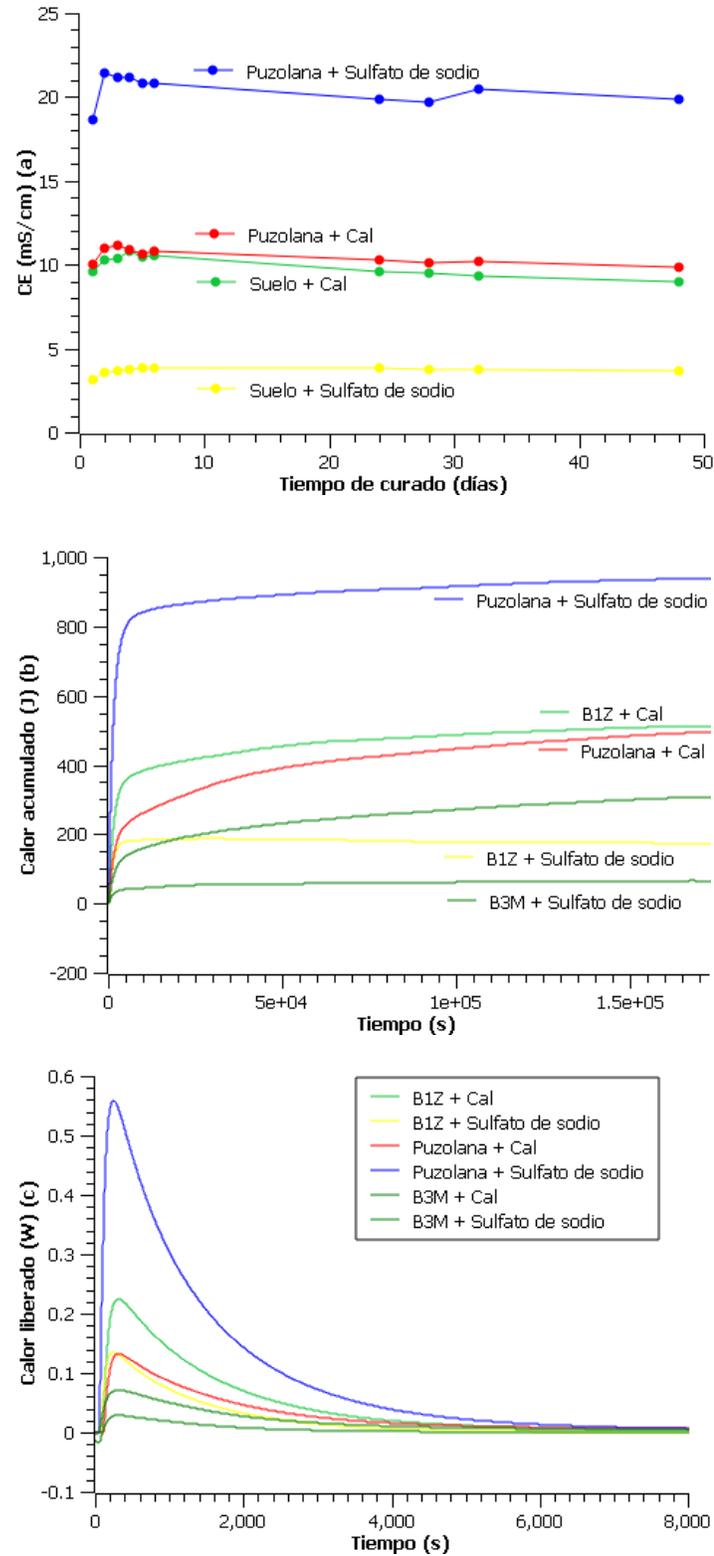
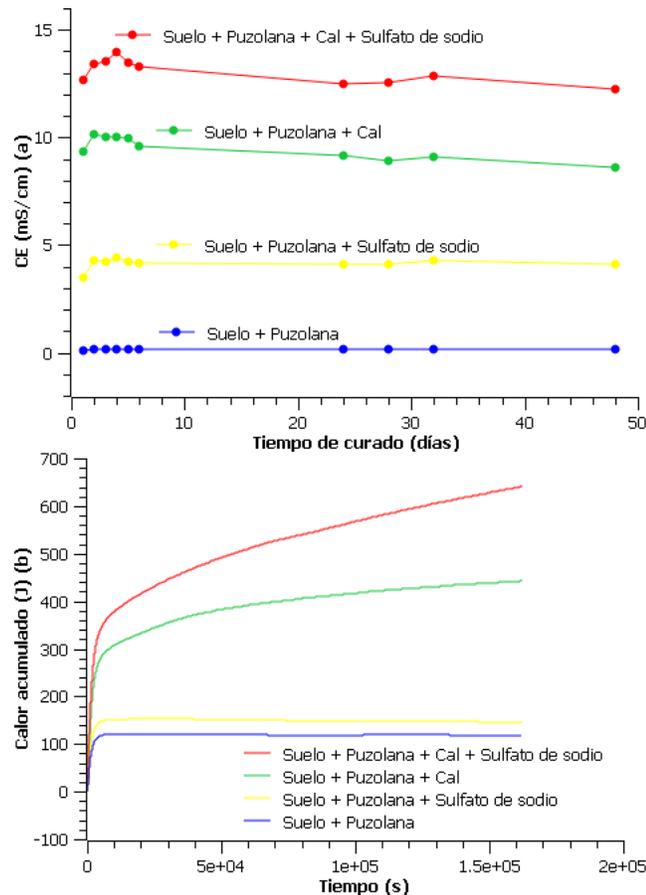


Figura 42 Comparaciones de CE (a) y Calorimetría: Calor acumulado (b) y Calor liberado (c) para los sistemas 1-4

Para los sistemas del 5 al 7 y 12 (Figura 43). Se observa que cuando se mezclan el suelo con la puzolana natural, ambos reaccionan mejor con la cal que con el sulfato de sodio, esto porque el material predominante es el suelo, sin embargo, cuando se mezclan Suelo + Puzolana + Cal + Sulfato de sodio se mejora la reacción aun siendo el suelo el que predomina en el sistema, puesto que, sin ellos en el sistema de Suelo + Puzolana natural no existe reacción alguna. Este aumento puede estar atribuido a la alta reacción entre la puzolana natural y el sulfato de sodio por un lado y Suelo cal por el otro, aunque también una parte de la puzolana reacciona con la cal y una parte del suelo con el sulfato [106]. Es por estos resultados que nuevamente se podría decir que existe una mayor inclinación a la activación alcalina de la puzolana natural que a una reacción puzolánica por la presencia del sulfato de sodio, esto con relación a los sistemas del No. 1 al 4.



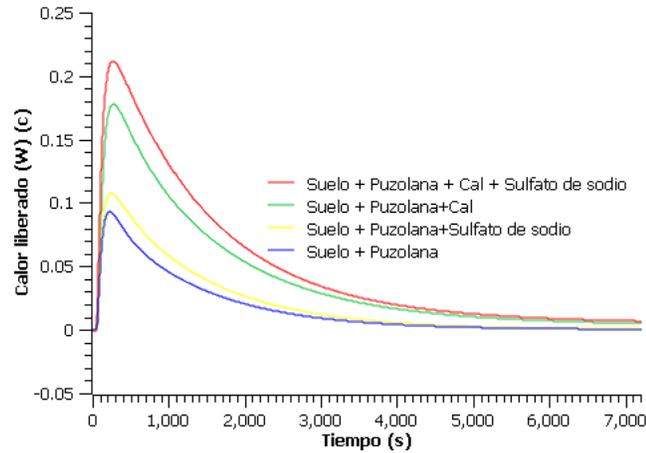


Figura 43 Comparaciones de CE (a) y Calorimetría: Calor acumulado (b) y Calor liberado (c) para los sistemas 5, 6, 7 y 12.

En los sistemas de la Tabla 8. Del No. 8 al 11, el sulfato de sodio presenta la mayor CE, esto debido a que se disuelve completamente en agua y sus iones quedan totalmente libres, estando por debajo la cal, y muy por debajo el suelo y la puzolana natural. La baja CE en la solución de los materiales de tierra (Suelo y Puzolana natural) se explica por el contenido limitado de elementos alcalinos y alcalinotérreos (Figura 44).

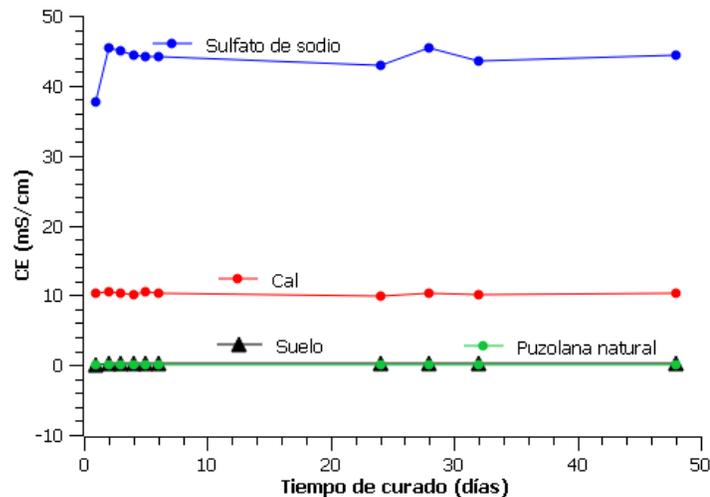


Figura 44 Comparaciones de CE para los sistemas 5, 6, 7 y 12.

En los sistemas del No. 13 al 15 se puede observar que Cal + Sulfato de sodio tienen la más alta CE. Cuando a estos dos se agrega Puzolana y por otro lado se agrega el Suelo, por lo observado se puede decir que la puzolana natural es más reactiva que el

suelo, ya que permite una elevada CE pues el ambiente alcalino permite la liberación de los iones de sílice y alúmina presentes en la Puzolana natural (Figura 45). Esto relacionado también con lo comentado en los sistemas simples del 1 al 4.

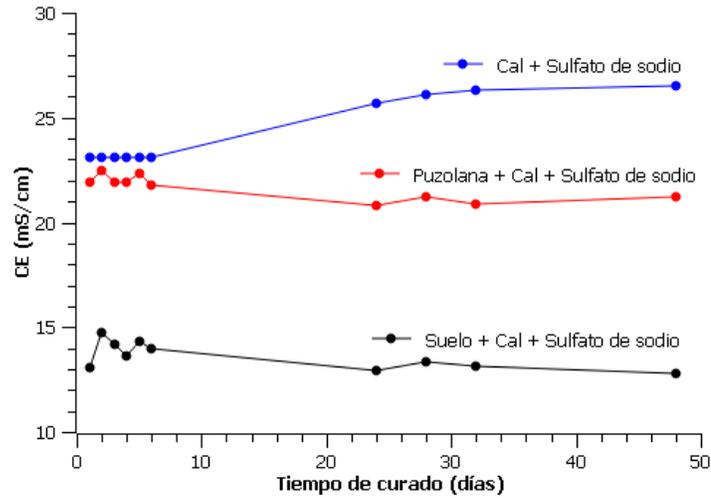


Figura 45 Comparaciones de CE para los sistemas 8-12.

4.4 Resultados de la Etapa 4: Resistencia a compresión y durabilidad

Como parte de la etapa 4 se exponen los resultados obtenidos en los ensayos que evaluaron la capacidad de los materiales estabilizados para resistir cargas a compresión, oposición a la deformación y durabilidad. Además, se muestran los resultados por técnicas de caracterización de los suelos ya estabilizados. Estos resultados son fundamentales para verificar la aptitud de los materiales en términos de estabilidad, asegurando que cumplan con los estándares requeridos por las normativas actuales de construcción.

4.4.1 Resistencia a compresión de cubos 5 x 5 cm

En las Figuras 46 y 47 se muestran las resistencias obtenidas del ensayo a compresión de los cubos de tierra comprimida con relación a/c 0.5 de B1Z y B3M respectivamente, donde en ambos casos puede apreciarse que la adición de Cal para estabilizar los suelos pudiera no estar beneficiando la resistencia a compresión, ya que los suelos naturales de B1Z y B3M tienen las resistencias más altas a lo largo de los 28 días de curado sufriendo una pérdida de resistencia de los 7 a los 14 días y recuperándola a los 28 días pero sin superar las muestras de suelo natural a diferencia de B1Z con el 2.5% de Cal que sí se comportó de manera ascendente de los 7 a los 14 días caso contrario con B3M que con el mismo 2.5% mostró pérdida de resistencia. Esto podría deberse a que el suelo natural trabaja en condiciones de humedad óptima determinadas con la Proctor y que la adición de la a/c del 0.5 no sea suficiente para generar el ambiente alcalino necesario para la reacción puzolánica y que esta adición de Cal esté consumiendo el agua calculada del suelo para su masa volumétrica seca máxima, además del curado en horno que no permite la humedad necesaria para la reacción.

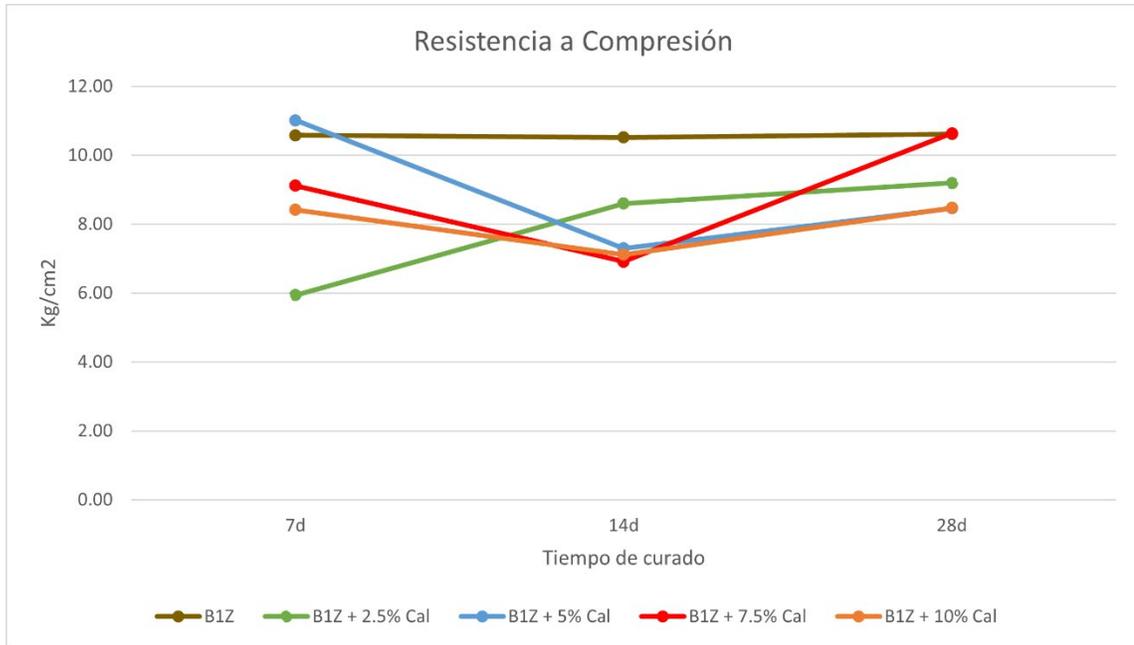


Figura 46 Resistencia a compresión B1Z cubos a/c 0.5

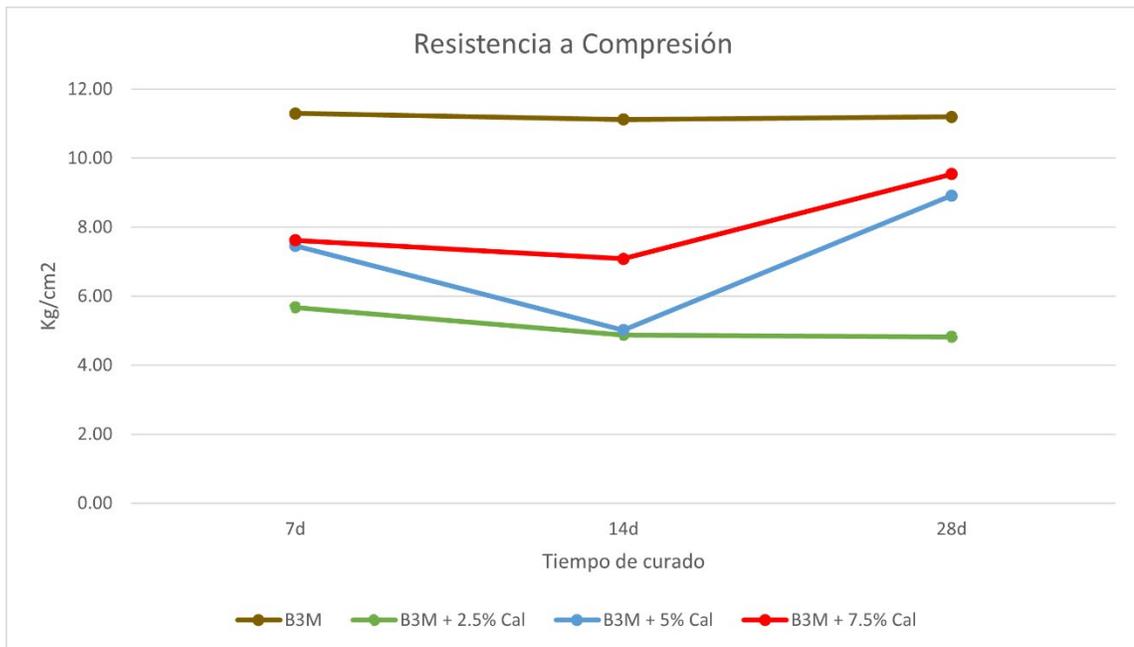


Figura 47 Resistencia a compresión B3M cubos a/c 0.5

Por lo anterior se hicieron pruebas con distintas relaciones a/c (0.7, 1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 y 1.5) para determinar la óptima para la estabilización y para un mejor manejo de las dosificaciones no solo para distintos porcentajes de cal sino también para los porcentajes

de suelos estabilizados con PA. Donde la relación óptima fue de 1.1 procediendo a realizar una nueva serie de cubos estabilizados con cal con dicha relación y curados sellados en bolsa a temperatura ambiente para garantizar la humedad necesaria para la reacción puzolánica. En la Figura 48 se muestran los resultados a compresión, dónde los cubos estabilizados con la adición del 10% de PA alcanzaron la máxima resistencia a la compresión y por encima de los estabilizados con cal desde edades tempranas, alcanzando los 30 kg/cm^2 y los 20 kg/cm^2 a 7 días respectivamente y estando por encima de los 100 kg/cm^2 para B1Z y los 80 kg/cm^2 para B3M a 180 días. Y en comparación con las soluciones y la medición de pH y CE, es acorde con los resultados, además que el proceso de curado en bolsa ayuda a evitar la pérdida de humedad y el secado de las muestras.

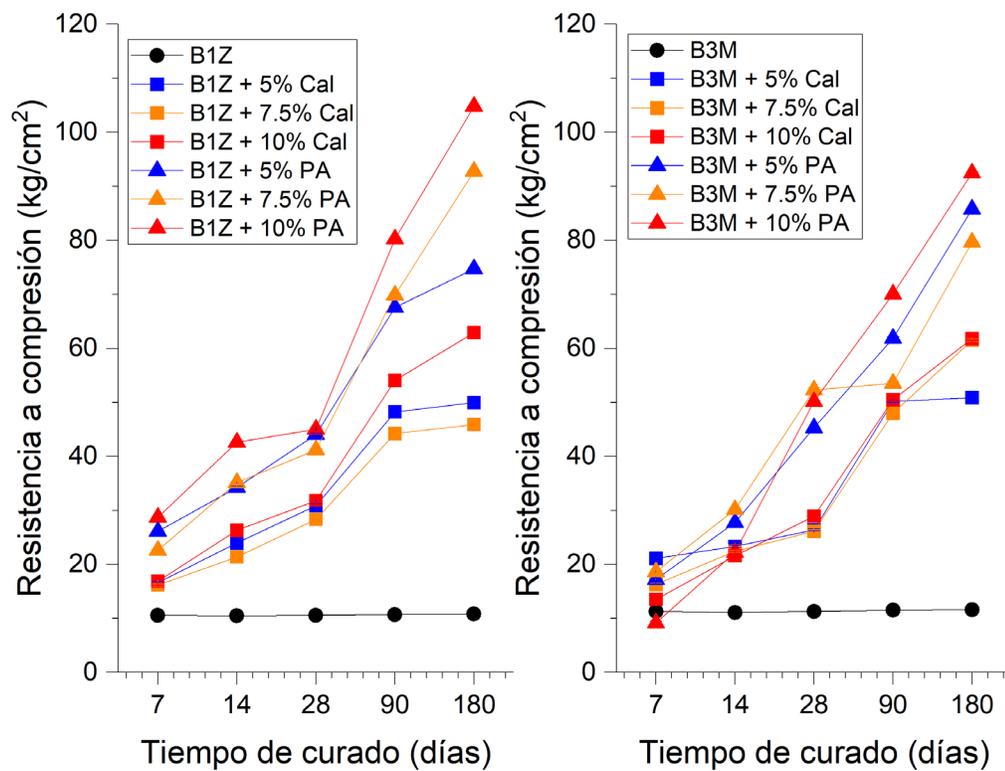


Figura 48 Resistencia a compresión B1Z cubos a/c 1.1

4.4.2 Durabilidad de los especímenes de suelos estabilizados

Posteriormente se realizaron los ensayos de durabilidad, de los cuales se muestran los resultados de las muestras de suelo a 28 días ya que son más representativos. Como se observa en la Tabla 10, en el ensayo inicial de ciclos de humedecido/secado, los cubos naturales fueron los únicos que presentaron fallas, al deshacerse totalmente al contacto con el agua. Posteriormente para abrasión hídrica como era de esperarse se catalogaron como “No aptos”, al sobrepasar los límites establecidos de oquedad por goteo siendo 16.71 y 21.53 mm para B1Z y B3M respectivamente, y en cuanto a erosión acelerada 2.40 y 3.07 mm para B1Z y B3M ambos con el 5% de adición de cal no presentando perforación para ningún otro tipo de muestra. Por último, para el ensayo de inmersión total, este ensayo permite evaluar la absorción, y se relaciona con los poros presentes en la muestra, cuanto mayor es el porcentaje, mayor cantidad de poros [92,107,108]. Como se esperaba por los resultados del ensayo RC, las muestras con el 10% de PA tuvieron el menor porcentaje de absorción a 24h. Las muestras estabilizadas con cal se encontraron ligeramente por encima de los límites recomendados (15-20 %). Así pues, se observa que la absorción de agua de los suelos estabilizados con cal y PA disminuyó con el aumento del contenido de estabilizante [109–111]. No se determinó la absorción para las muestras de suelos no estabilizados ya que se degradaron completamente.

Tabla 10 Ensayos de durabilidad a 28 días de muestras de suelos naturales y estabilizadas con cal y PA

| Condición | Cal | | | PA | | | Cal | | | PA | | | |
|--------------------------|--|-----|----------|----|----------|-----|-----|----------|----|----------|--|--|--|
| | B1Z | 5 % | 7.5% 10% | 5% | 7.5% 10% | B3M | 5 % | 7.5% 10% | 5% | 7.5% 10% | | | |
| Ciclos Humedecido/secado | Modelo de grietas aleatorio | • | | | | • | | | | | | | |
| | Modelo de grietas en estrella | • | | | | • | | | | | | | |
| | Hinchamiento local | • | | | | • | | | | | | | |
| | Picado local en al menos 5 zonas | • | | | | • | | | | | | | |
| | Pérdida general o local de capas de suelo | • | | | | • | | | | | | | |
| | Penetración de agua en más de 70% del ancho de la muestra. | • | | | | • | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|---------------------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| | Pérdida de fragmentos mayores a 50 mm | • | | | | | | | • | | | | | | |
| Abrasión Hídrica | Ensayo por Goteo | 16.71 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 21.53 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | D (Profundidad de perforación) en mm | No Apto | Apto | Apto | Apto | Apto | Apto | Apto | No Apto | Apto | Apto | Apto | Apto | Apto | Apto |
| | 0 < D ≤ 10 | | | | | | | | | | | | | | |
| | D > 10 | | | | | | | | | | | | | | |
| Abrasión Hídrica | Erosión acelerada | NA | 2.26 | 2.19 | 0 | 0 | 0 | 0 | NA | 3.82 | 3.51 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | D (Profundidad de perforación) en mm | | Apto | Apto | Apto | Apto | Apto | Apto | | Apto | Apto | Apto | Apto | Apto | Apto |
| | 0 < D ≤ 15 | | | | | | | | | | | | | | |
| | D > 15 | | | | | | | | | | | | | | |
| Inmersión Total | Ws (%) | NA | 16.59 | 16.53 | 15.60 | 14.39 | 14.39 | 13.87 | NA | 17.01 | 16.98 | 16.43 | 15.55 | 15.24 | 15.1 |
| | $\frac{Ms - Md}{Md} \times 100$ | | | | | | | | | | | | | | |

4.4.3 Desempeño y oposición a la deformación de los suelos estabilizados

Posteriormente a los ensayos de durabilidad, en la Figura 49 se muestran los resultados de CBR al 100% que fueron de 4.1% para B1Z y 8.07% para B3M, siendo B3M el de mejor calidad y mayor soporte ya que su rango se encuentra entre 7-20% y podría ser colocado como material terraplén sin estabilizar. Por otra parte, B1Z se encuentra muy por debajo de los parámetros y no alcanza ninguna categoría. Sin embargo, al ser estabilizado tanto con cal como con PA supera por mucho a B3M. A los 7 días B1Z registró CBR de 88.20 y 81% para PA y cal respectivamente mientras que B3M alcanzó los 82.33 y 54.67%. Y para los 28 días de sumergidos B1Z superó completamente las expectativas pues logró 300.53% para PA al 0.1 pulgadas de penetración (2.54 mm) y B3M 203%. La mejora resultante en el valor de los CBR sumergidos con la adición de cal y PA se puede atribuir a la reacción puzolánica entre el suelo y los estabilizantes que forman un material cementicio adicional que une las partículas y mejora la resistencia del suelo [82,83,112]. El efecto del sumergido de los CBR muestra que la resistencia aumentó a medida que aumentaba el período de inmersión, esto debido a que las reacciones puzolánicas son dependientes del tiempo y de la disponibilidad de agua para hidratarse, y

la estabilización del suelo es un proceso a largo plazo [84,113]. Los resultados muestran que los valores de las pruebas CBR están en buen acuerdo con los valores experimentales anteriores y que las mezclas de suelo estabilizadas desarrollaron una oposición a la deformación satisfactoria y se pueden utilizar como terracerías para la construcción de pavimentos.

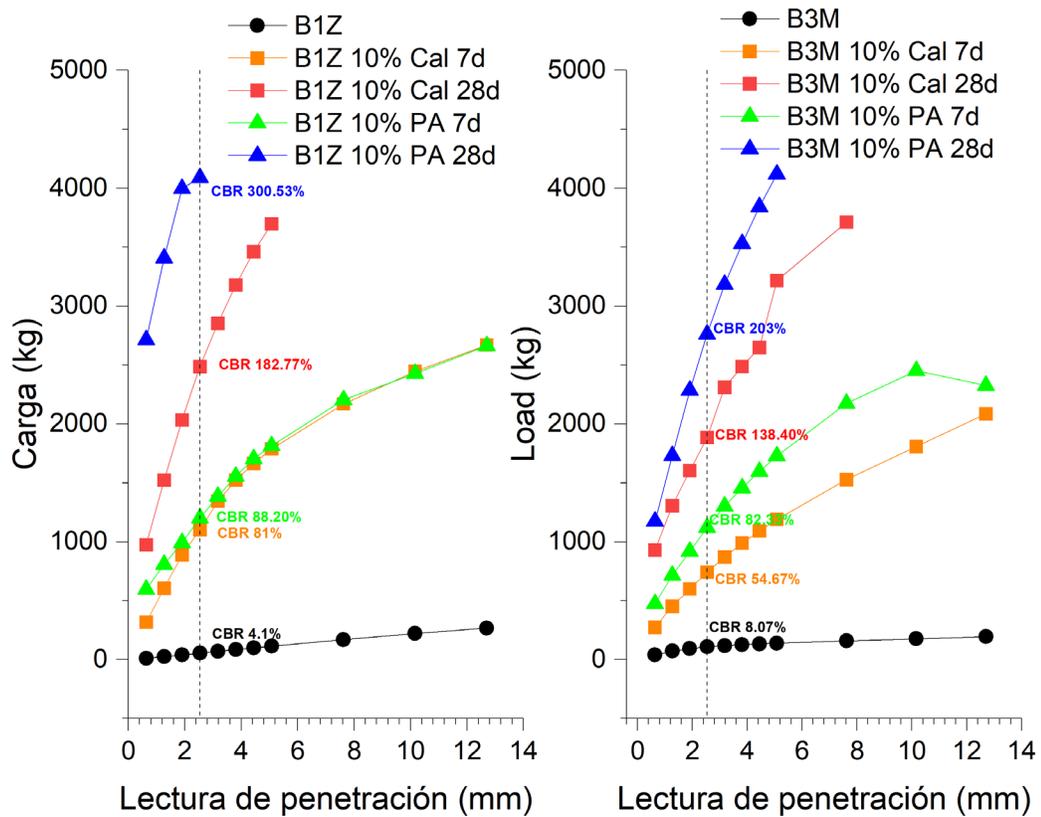


Figura 49 CBR al 100% de B1Z (Izq.) y B3M (Dcha.) estabilizados con cal y PA.

4.4.4 Caracterización y análisis de los suelos estabilizados

Después de la elaboración y ensayo de los nuevos cubos con la versión mejor hidratada, se realizó una nueva caracterización por medio de DRX, y también se añadió la caracterización por FTIR, con el fin de confirmar los productos de reacción derivados

de la estabilización de suelos con cal y por medio de la activación alcalina de la puzolana natural (arena volcánica). En las Figura 50 y 51 se muestran los Difractogramas de B1Z y B3M naturales y comparados con el 10 % de Cal y con el 10% de la puzolana natural activada alcalinamente a 7 y 28 días respectivamente. En el análisis de las fases de los cubos naturales y de la versión mejor hidratada con cal y puzolana curados a temperatura ambiente sellados en bolsa reveló nuevamente la presencia de Cuarzo y Calcita para ambos suelos además de Montmorillonita para B1Z y Albita para B3M, sin embargo, se puede observar una considerable disminución en las intensidades de los picos de los suelos estabilizados conforme pasa el tiempo de curado de 7 a 28 días en ambos sistemas. Esta situación indica que hubo una reestructuración de estos minerales después de la estabilización por cal y por medio de la activación alcalina de las puzolanas naturales, siendo el 10% de puzolana natural curados a 28 días tanto para B1Z como para B3M los de menor intensidad, en donde estas fases debido a la alcalinidad producida por la elevación del pH provocó su disolución para formar geles cementantes como CSH, CAH, NASH, etc., que a menudo se desarrollan en fases amorfas o muy poco cristalinas por lo que no es posible identificarlos en esta técnica [114–117].

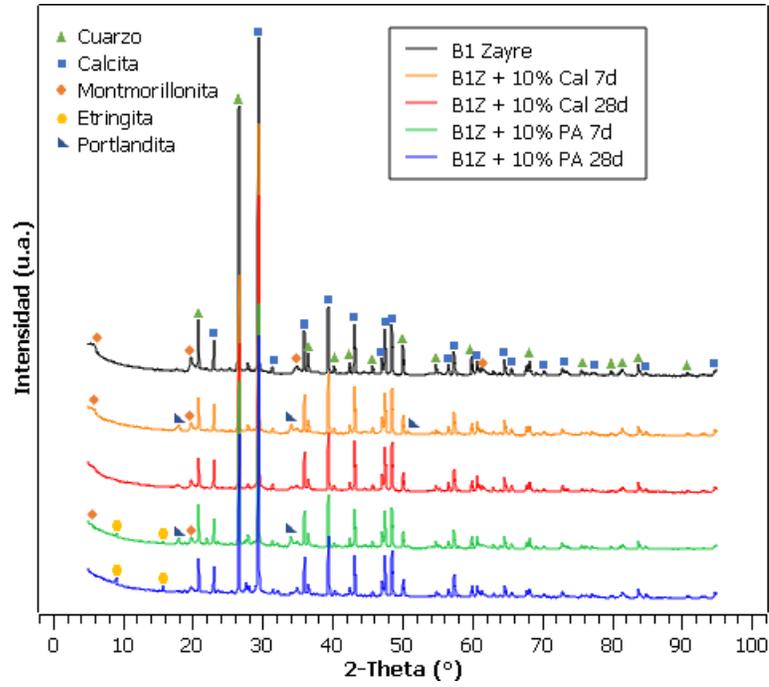


Figura 50 Comparativa DRX BIZ después de la estabilización

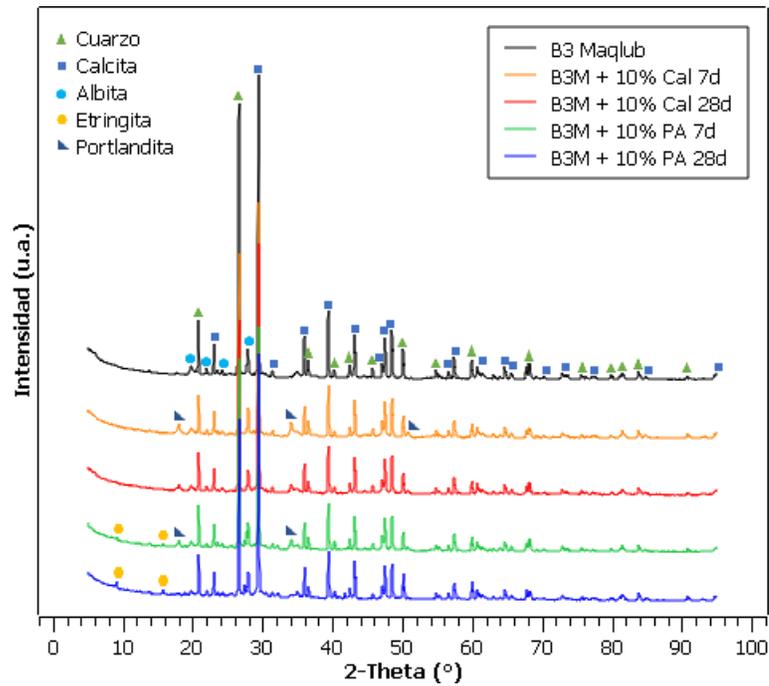


Figura 51 Comparativa DRX B3M después de la estabilización

De igual manera, para confirmar las reacciones derivadas de la estabilización de los suelos en las Figuras 52 y 53 se muestran los espectros FTIR de B1Z y B3M respectivamente naturales y después de la estabilización con el 10% Cal y el 10% de la Puzolana Natural activada alcalinamente, donde en ambos casos se observan longitudes de onda aproximadamente a 435, 510 y 1000 cm^{-1} los cuales pertenecen a vibraciones de flexión de Si-O y Si-O-Si, atribuidas en este caso a las bandas presentes generalmente en el Cuarzo siendo la banda de absorción principal a los 1000 cm^{-1} . De igual manera se observan bandas de absorción aprox. en 890 y 1430 cm^{-1} correspondientes a bandas de vibración de estiramiento asimétrico y flexión de O-C-O, las cuales están relacionadas con las vibraciones características de la Calcita, mientras que a 1650 cm^{-1} se aprecian unas ligeras bandas que corresponden a la vibración H-O-H, dado que en este rango se generan bandas por las moléculas de agua, las cuales son un indicador de hidratación de los materiales, que de igual manera que los DRX se ve una disminución en todas las bandas mencionadas anteriormente (aumento en la transmitancia) conforme pasa el tiempo de curado de 7 a 28 días, teniendo una menor transmitancia las muestras con el 10% de la puzolana natural tanto para B1Z como para B3M, lo cual de igual manera es un indicador de la reestructuración de fases y enlaces de los materiales provocado por la estabilización de los suelos para la formación de productos cementantes [118–122].

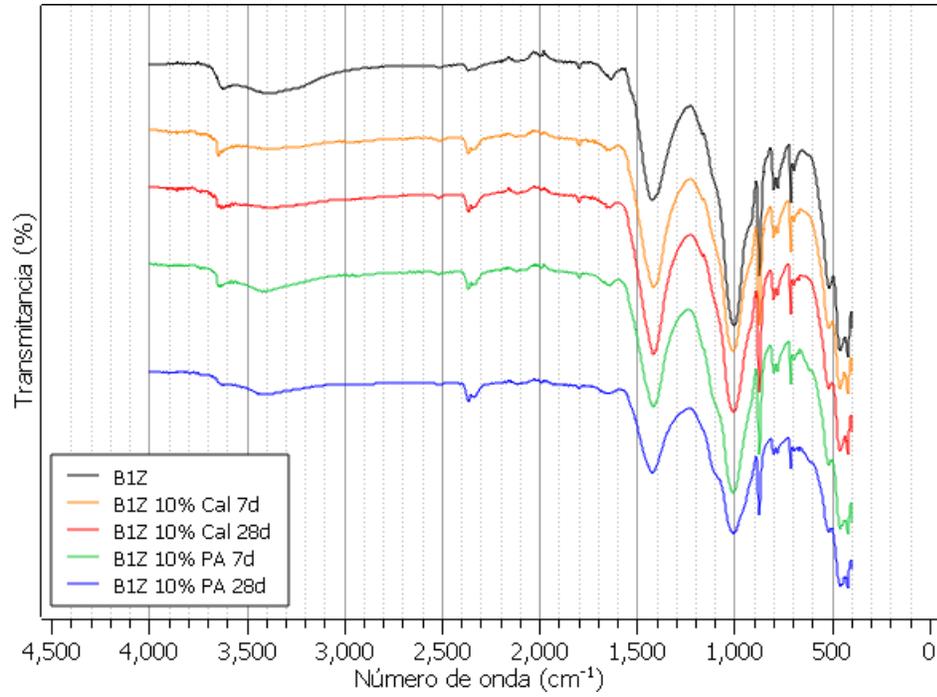


Figura 52 Comparativa FTIR B1Z después de la estabilización

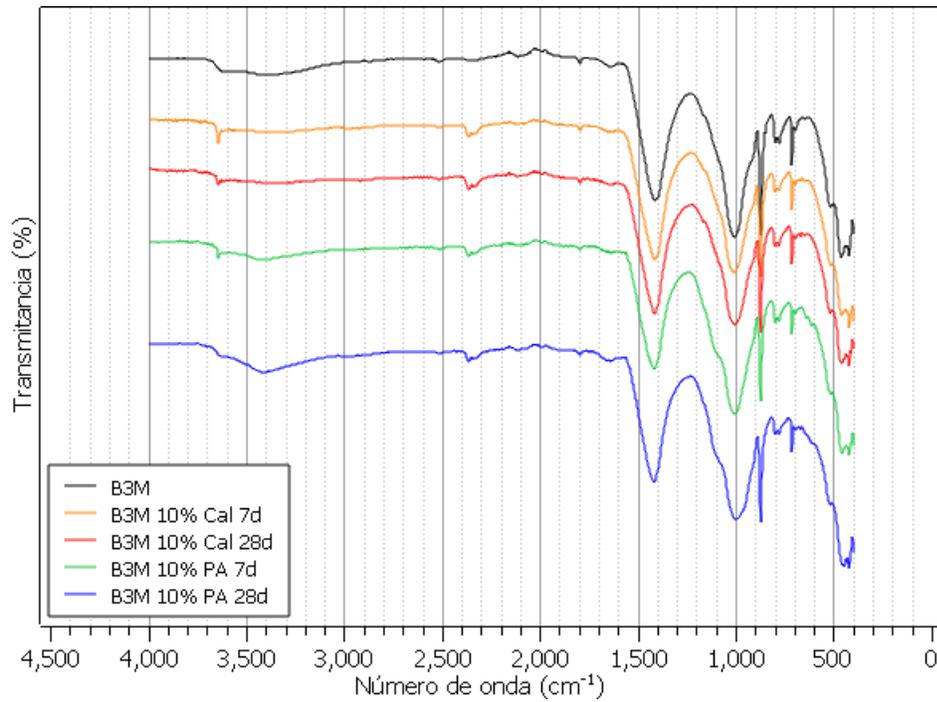


Figura 53 Comparativa FTIR B3M después de la estabilización

En las figuras 54 y 55 se muestran los termogramas TGA-DTG para B1Z y B3M naturales y estabilizados respectivamente, donde se observa la presencia de cuatro picos principales en cuatro rangos de temperatura, de los 0-100°C, 100-200°C, 400-600°C y 700-800°C para ambos tipos de suelos tanto naturales como estabilizados. Para B1Z y B3M naturales en el primer rango de temperatura se aprecia la primera pérdida de peso 3.78 y 2.05% a temperaturas muy bajas aproximadamente a 60°C que se puede atribuir a la pérdida de agua higroscópica (agua fuertemente ligada al material) siendo más alto para B1Z, esto con relación a su naturaleza por la presencia de minerales arcillosos puesto que contiene montmorillonita y suele almacenar más agua a diferencia de B3M. Para B1Z y B3M estabilizados con cal dentro de este primer rango de temperatura se produce la deshidratación de los hidratos de silicato de calcio, denominada fase CSH, siendo el principal producto de hidratación para estos sistemas perdiendo 4.42 y 3.01% respectivamente. Para B1Z y B3M estabilizados con la activación alcalina de la puzolana natural indica la presencia de la fase AFt en forma de Etringita por la pérdida de peso de 4.82 y 3.66% aproximadamente a los 75°C aunque con la ausencia del breve hombro provocado en el segundo rango de temperatura entre 100-200° que aparece en ambos suelos estabilizados con cal donde se aprecian de manera pronunciada las fases AFm en forma de Hemi y Monocarboaluminatos con una pérdida del 4.30 y 1.35% en peso, que a diferencia de los suelos naturales en este segundo rango de temperatura el pequeño hombro formado aproximadamente a los 112°C se debe a la eliminación del 1.04 y 0.69% del agua ligada con un puente hidrógeno característico de estos materiales. En el tercer rango de temperaturas entre 400-600°C solo los suelos naturales y los estabilizados con cal mostraron pérdidas de peso de 5.75 y 4.36%, siendo para los naturales la

deshidroxilación de los minerales arcillosos a los 466°C y para los estabilizados con cal aproximadamente a los 415°C ocurre una pérdida del 0.52 y 0.61% atribuida a la descomposición del hidróxido de calcio cristalino mejor conocido como Portlandita. Y para el último rango de temperatura de entre los 700-800 °C para todos los sistemas naturales y estabilizados con cal y puzolana para B1Z y B3M se debe a la decarbonatación de la calcita con 18.19, 20.11 y 15.69% para B1Z y 15.93, 20.56 y 12.35% para B3M. [1,123–131].

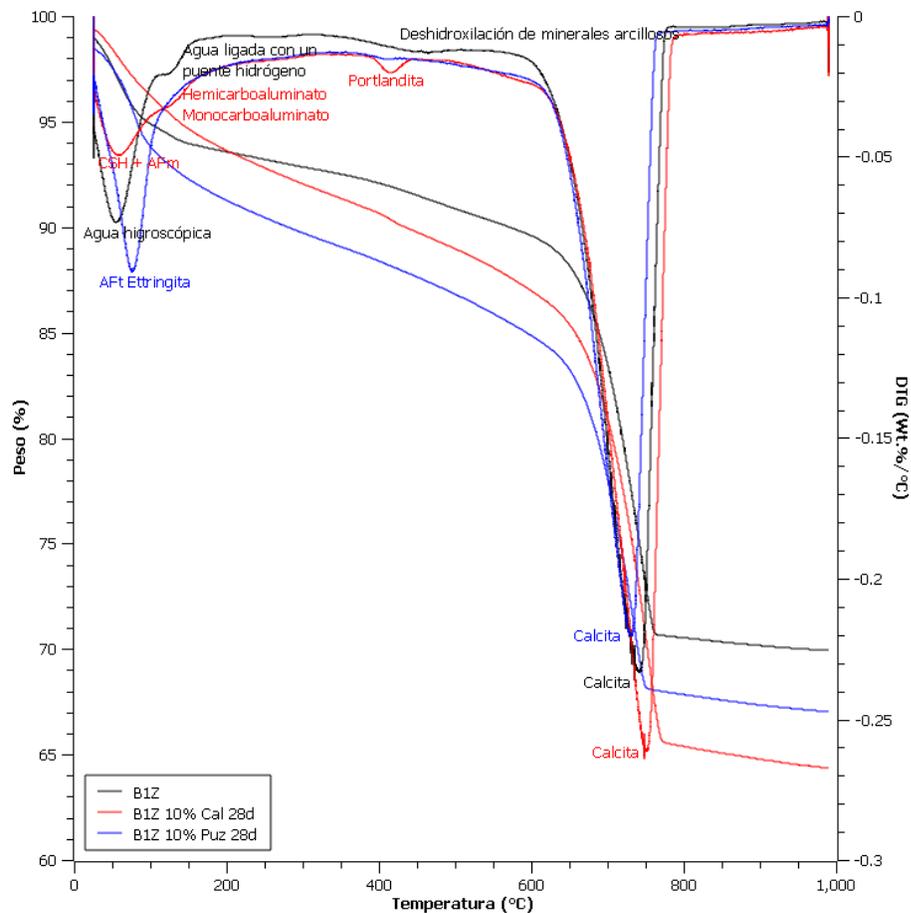


Figura 54 Comparativa TGA-DTG B1Z después de la estabilización

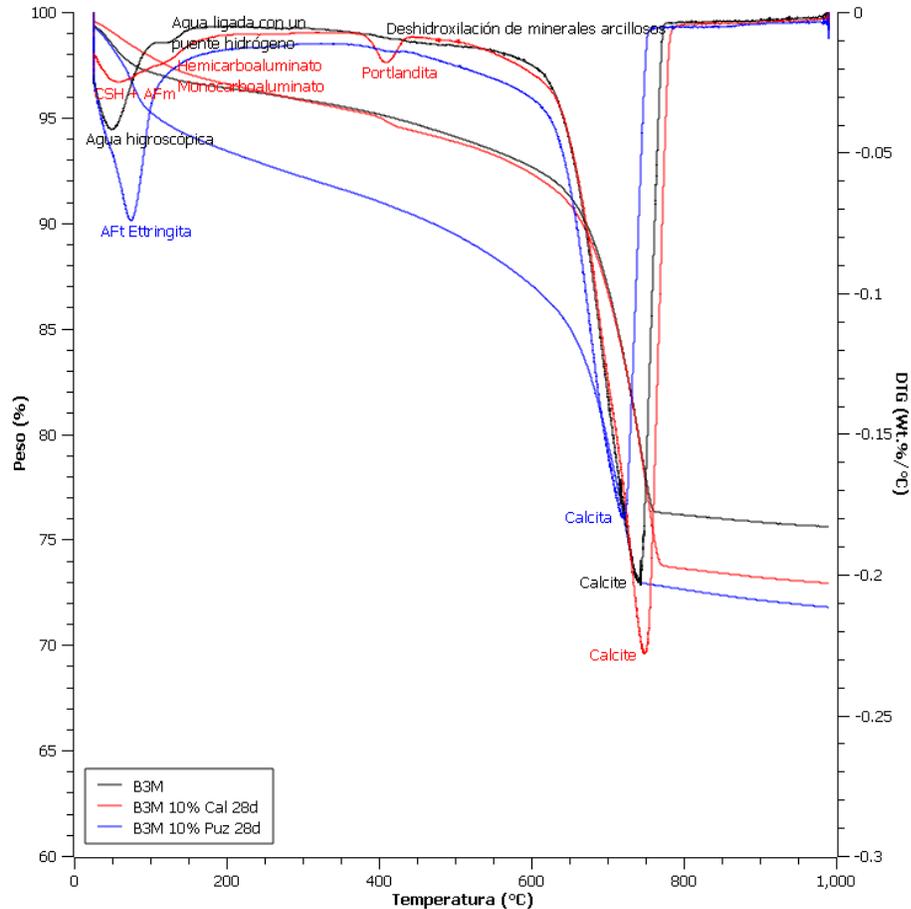


Figura 55 Comparativa TGA-DTG B3M después de la estabilización

Para comprender las características microestructurales de los suelos naturales y estabilizados, se analizaron las muestras mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) complementada con espectroscopía de dispersión de energía (EDS) y análisis puntual para identificar su composición química elemental y evaluación química de los geles aglutinantes desarrollados. El análisis se llevó a cabo con un equipo JEOL Scanning Electron Microscope JSM-6510LV. Los análisis se hicieron a 3 aumentos: x100, x500 y x1000 con una distancia $Z = 15$ mm aprox. Sin embargo, en los x1000 aumentos se puede observar mejor la diferencia entre las muestras analizadas. En la Figura 56 se muestran las micrografías a x1000 aumentos de los suelos naturales a) y b), los estabilizados con

cal c) y d), y los estabilizados con PA e) y f). En los suelos naturales se puede apreciar una alta porosidad, que probablemente se debe a los espacios que quedan después de la evaporación del agua durante el proceso de curado y el posterior secado en horno [118]. También es posible observar en las figuras que la porosidad disminuye con el aumento del porcentaje y el tipo de los estabilizadores, aun manteniendo la fuerza de compactación. B1Z tiene una textura más porosa, mientras que B3M presenta una estructura más compactada, esto con relación a que el suelo fue elegido de acuerdo con sus características físicas (granulometría y consistencia).

Los suelos estabilizados con cal y PA muestran una morfología de estructura homogénea y bastante mejor compactada, donde las partículas de suelo se encuentran aparentemente bien cementadas con la adición de los estabilizantes, donde es claro el efecto aglomerante del material [132]. En c) y d) se presentan las partículas de suelo cementado con mayor detalle, donde es posible detectar las partículas de suelo incrustadas en lo que parece ser la matriz cementicia. Es difícil encontrar las partículas de CSH o CAH recién formados que podrían envolver como gel a las partículas de suelo [133,134]. Donde la diferencia más notable se encuentra en e) y f) suelos estabilizados con PA, ya que muestran la formación de cristales de etringita en forma de aguja que se observaron en abundancia principalmente en las muestras de B1Z que estaba dominado por grupos de agujas de etringita. La razón podría deberse a la presencia de aluminato de calcio hidratado (CAH) y portlandita (CH) que reaccionan con el sulfato añadido para la activación de PA con la cual se formó etringita, y estos cristales son los responsables de la ganancia de masa y el desarrollo de la fuerza y la resistencia a compresión al llenar los poros de la

microestructura [135–137]. Así, en este estudio es ventajosa la formación de etringita, esta observación confirmó los hallazgos del análisis DRX.

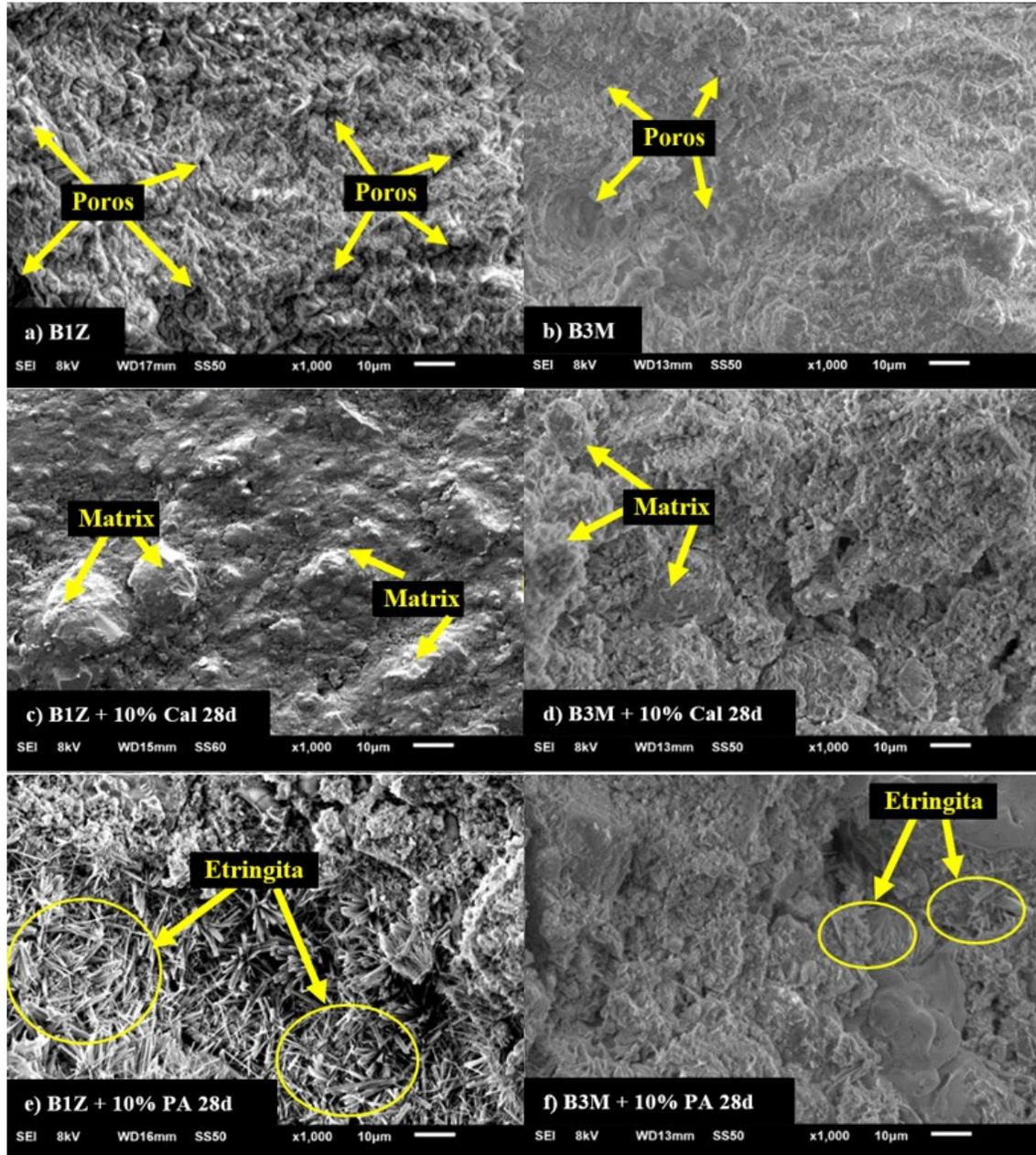


Figura 56 Micrografías de suelos naturales y estabilizados con cal y PA

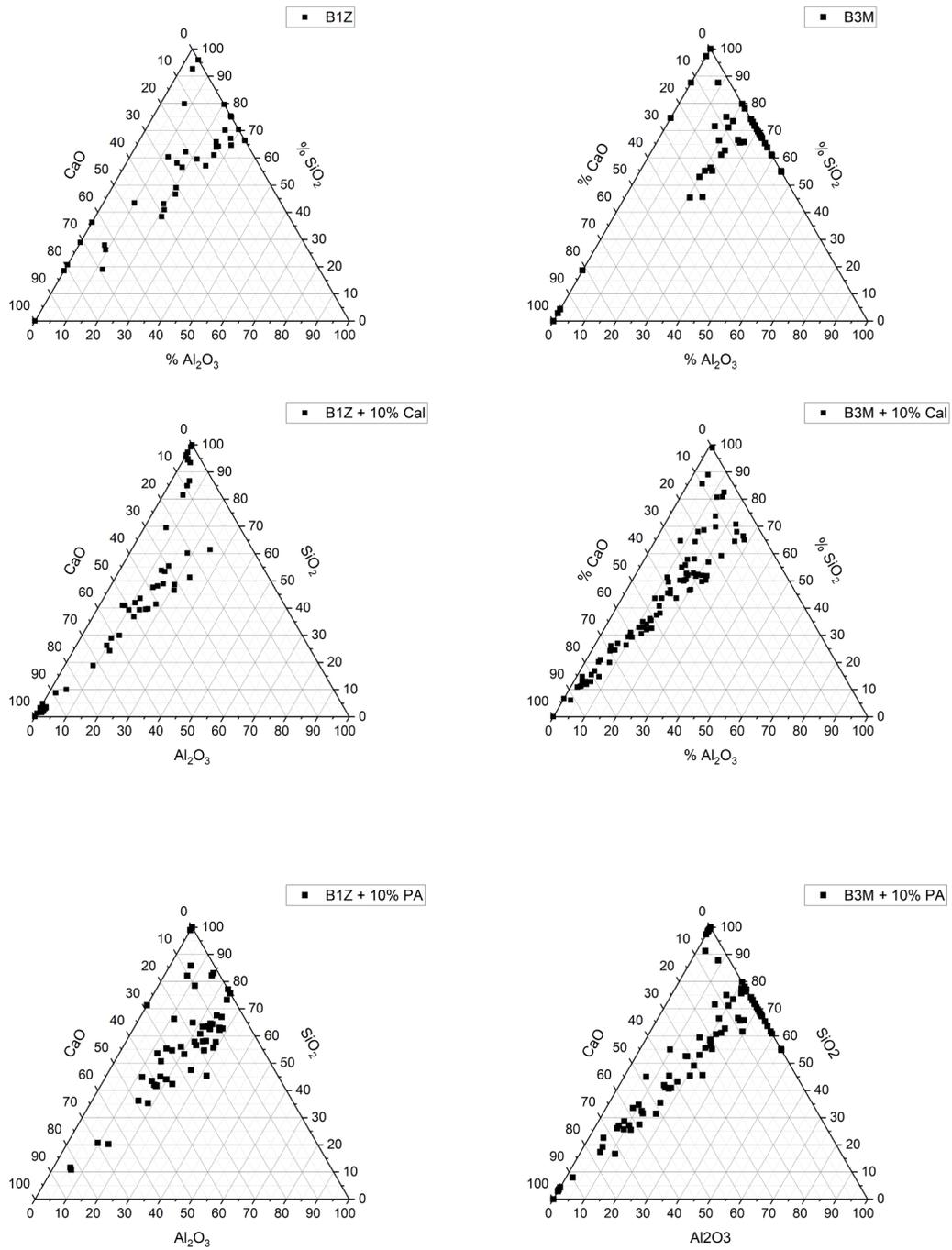


Figura 57 Espectroscopia de Dispersión de Energía (EDS) para de suelos estabilizados con Cal y PA

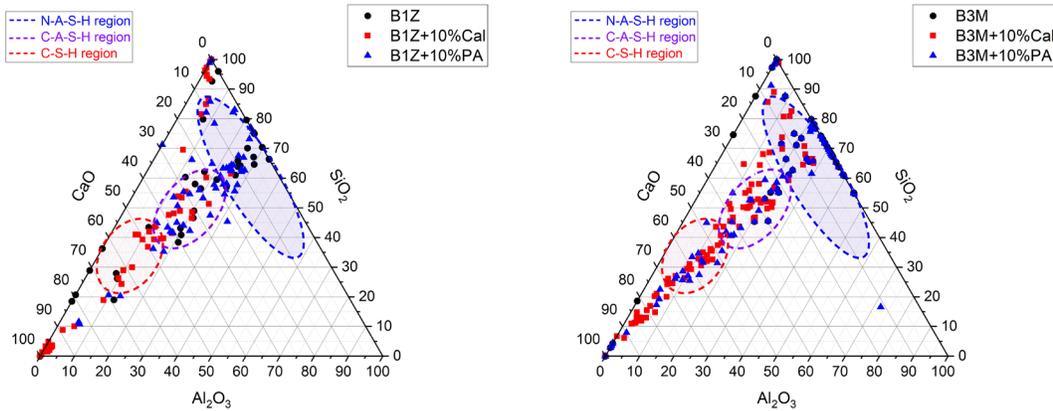


Figura 58 Resumen de Espectroscopía de Dispersión de Energía (EDS) para de suelos estabilizados con Cal y PA

En la figura 57 se muestran las Espectroscopías de Dispersión de Energía (EDS) para de suelos estabilizados con Cal y PA y en la Figura 58 un resumen de éstas en forma de diagramas ternarios; CaO, Al₂O₃ y SiO₂, que, basados en investigaciones previas, se puntúan las regiones típicas para los geles C-S-H, N(A)-SH y C(A)-S-H según García-Lodeiro et al., 2011 y Van Deventer et al., 2014 [138,139]. Los valores obtenidos de los análisis puntuales de la matriz parecen estar predominantemente ubicados en las áreas marcadas para las fases C(A)-S-H y N(A)-SH, lo que respalda aún más una activación alcalina de la puzolana natural. Esto ayuda a evidenciar el comportamiento mecánico que se obtuvo en estos sistemas cementantes con el paso del tiempo de hidratación (1–28 días), además de los resultados obtenidos por las técnicas instrumentales anteriormente descritas, que confirma la presencia y probable coexistencia de los geles mencionados, dónde los activadores alcalinos juegan un papel fundamental en la hidratación de los aglutinantes, que debido a sus características han mostrado resultados de resistencia mecánica superiores a los obtenidos por una reacción puzolánica o sin la presencia de ellos, además de la naturaleza del suelo. Se puede apreciar que B1Z con PA muestra más presencia en regiones C(A)-S-H y N(A)-SH lo que sugiere ya mejor formación de estos

productos, sin embargo, B3M con PA muestra también presencia en fases de C-S-H al igual que los estabilizados con Cal [140,141].

4.5 Resultados de la Etapa 5: Análisis eMergético

En la figura 59 y 60 se muestran los diagramas simplificados de flujos de energía en la producción de suelo estabilizado con cal y suelo estabilizado con PA, en la cual el sistema eMergético está delimitado por la caja en color rojo para formar el diagrama de 3 brazos según Howar T. Odum y Reynosa et al [142,143]. En el diagrama se aprecian los recursos renovables (símbolo de fuente a la izquierda fuera de la caja con el símbolo R) que influye en los procesos ambientales, y los recursos no renovables (símbolo de depósito dentro de la caja que delimita el sistema) que, aunque no se analizan en las tablas de análisis eMergético están siempre presentes en el sistema que recae en los procesos económicos industriales (Tablas 11–15). Además, de las energías adquiridas en importaciones como los materiales (cal, puzolana natural y activadores), mano de obra, así como la maquinaria y equipo. De la misma manera se muestra el símbolo de transacción (\$), que, a diferencia de los demás flujos de energía, éste se traslada en sentido contrario al sistema que finaliza con la Y (Salida del sistema) para definir la sostenibilidad respecto a la cantidad y calidad de energía transformada por un sistema de producción, en particular con el suelo estabilizado con cal o suelo estabilizado con PA. A partir de los diagramas se realizó el análisis de la eMergía de la producción de suelos estabilizados con cal y suelos estabilizados con PA tanto para 1 metro cúbico como para 1 km de carretera, indicando las transformidades de cada elemento del sistema.

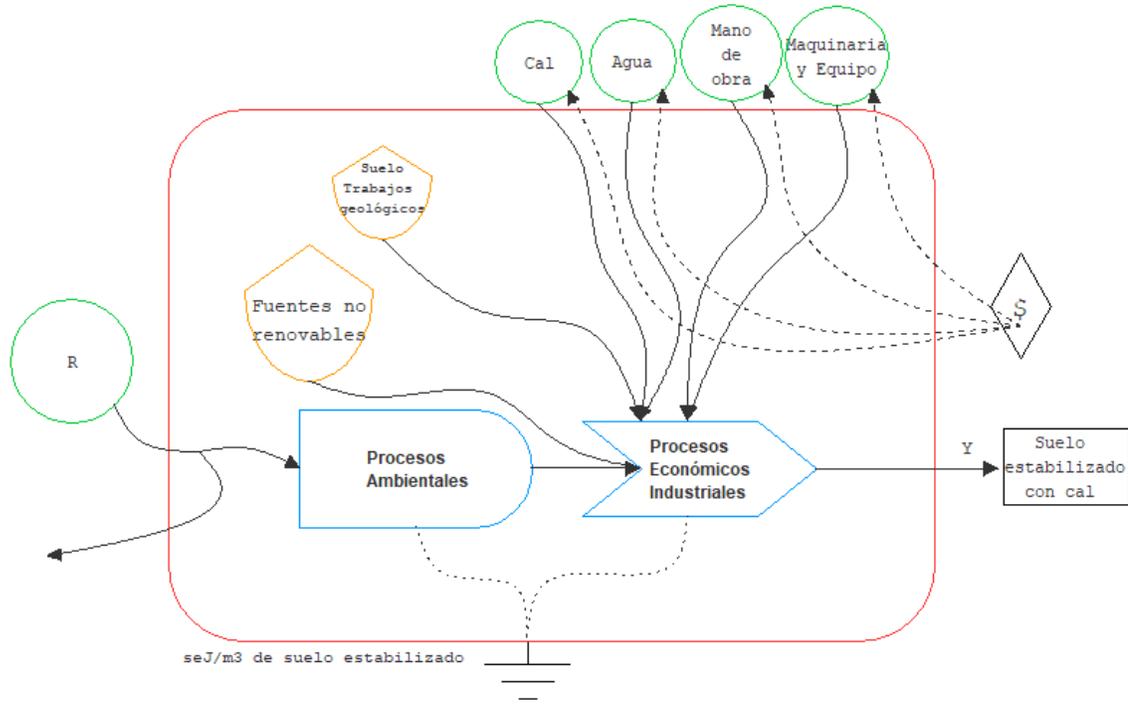


Figura 59 Diagrama simplificado de flujos de energía en la producción de suelo estabilizado con cal

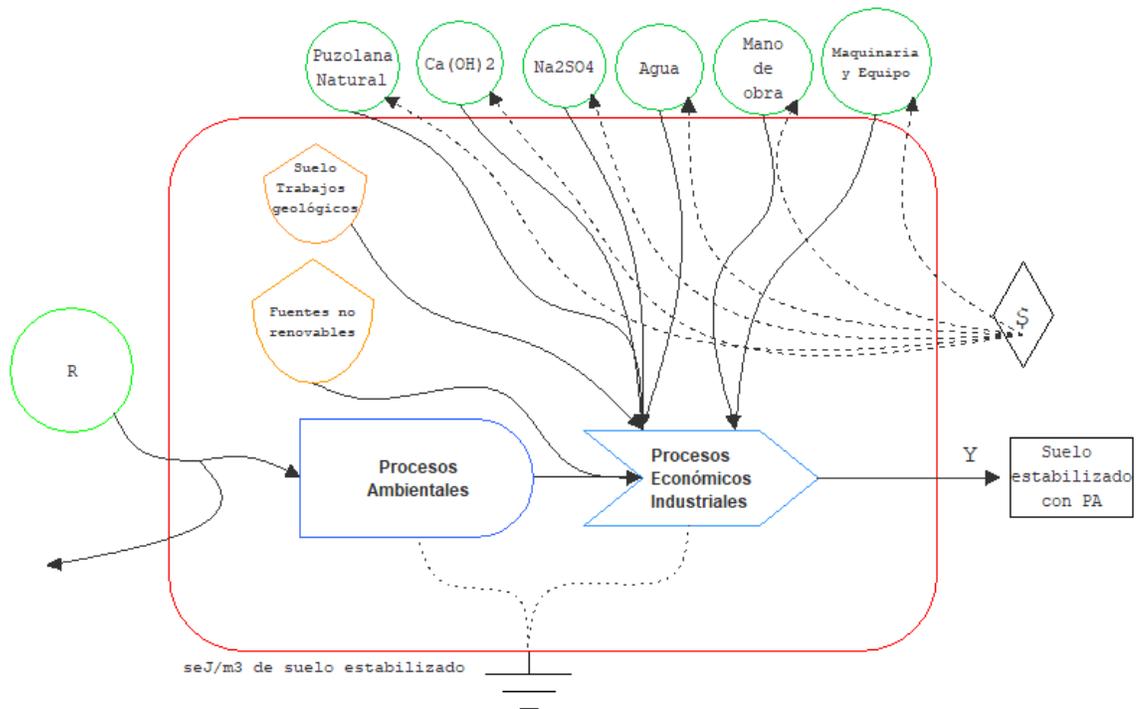


Figura 60 Diagrama simplificado de flujos de energía en la producción de suelo estabilizado con PA

Tabla 11 eMergía calculada para la producción de suelo estabilizado con cal

| Nota | Concepto | Unidades (unidad/m3) | Unidad | Transformidad eMergía/Unidad (seJ/unidad) | eMergía solar 1.00E+20 (seJ/año) |
|-------------------------------|--|-------------------------|--------|---|---|
| RECURSOS RENOVABLES | | | | | |
| 1 | Energía solar | 8.79E+05 | J | 1.00E+00 | 8.79E+05 |
| 1 | Agua puesta en el lugar de los trabajos | 2.50E+05 | g | 3.27E+06 | 8.18E+11 |
| RECURSOS NO RENOVABLES | | | | | |
| 2 | No aplican para el sistema | | | | |
| MATERIALES | | | | | |
| 3 | Banco de suelo B1 Zayre | 4.81E+09 | g | 3.29E+09 | 1.58E+19 |
| 4 | Cal comercial marca CALIDRA | 4.32E+08 | g | 3.61E+09 | 1.56E+18 |
| 5 | Diesel | 1.08E+08 | J | 6.60E+12 | 7.13E+20 |
| 6 | Lubricantes | 3.21E+05 | J | 6.60E+12 | 2.12E+18 |
| MAQUINARIA Y EQUIPO | | | | | |
| 7 | Tractor de orugas CAT. D8R, 305 HP, 37580 KG. | 1.30E+02 | g | 6.70E+00 | 8.74E+02 |
| 8 | Excavadora Hidráulica CAT. 320 C, 138 HP, 19700 Kg, 0.45-1.5 M3. | 1.52E+02 | g | 6.70E+09 | 1.02E+12 |
| 9 | Motoniveladora CAT. 120 H de 140 HP, 15906 kg | 1.10E+02 | g | 6.70E+09 | 7.40E+11 |
| 10 | Vehículo con cisterna PIPA de 10 M3, 156.45 KW, DIESEL, 15875 KG | 2.76E+01 | g | 6.70E+09 | 1.85E+11 |
| 11 | Camión de VOLTEO de 7 M3. | 8.33E+01 | g | 6.70E+09 | 5.58E+11 |
| 12 | Vibro compactador VAP 70 33.8 HZ, 0-14.5 KM/H, 7.03 TON | 1.22E+01 | g | 6.70E+09 | 8.15E+10 |
| 13 | Dosificadora EE-300DT DOBLE TOLVA BASE CEMENTADA 450 TONS/HR, 11 M3, 7.5 P, 25 TON | 6.43E+00 | g | 6.70E+09 | 4.31E+10 |
| SERVICIOS | | | | | |
| 14 | Mano de obra | 4.19E+06 | J | 4.77E+06 | 2.00E+13 |
| 15 | Mantenimiento y seguro | 9.46E-01 | \$ | 4.59E+13 | 4.34E+13 |

Tabla 12 eMergia calculada para la producción de suelo estabilizado con PA

| Nota | Concepto | Unidades (unidad/m ³) | Unidad | Transformidad eMergia/Unidad (seJ/unidad) | eMergia solar 1.00E+20 (seJ/año) |
|-------------------------------|--|--------------------------------------|--------|---|---|
| RECURSOS RENOVABLES | | | | | |
| 1 | Energía solar | 8.79E+05 | J | 1.00E+00 | 8.79E+05 |
| 2 | Agua puesta en el lugar de los trabajos | 2.50E+05 | g | 3.27E+06 | 8.18E+11 |
| RECURSOS NO RENOVABLES | | | | | |
| 3 | No aplican para el sistema | | | | |
| MATERIALES | | | | | |
| 4 | Banco de suelo B1 Zayre | 3.36E+09 | g | 3.29E+09 | 1.11E+19 |
| 5 | Puzolana natural Arena Volcánica | 4.32E+08 | g | 3.29E+09 | 1.42E+18 |
| 6 | Ca(OH) ₂ | 4.32E+08 | g | 3.61E+09 | 1.56E+18 |
| 7 | Na ₂ SO ₄ | 1.73E+08 | g | 3.29E+09 | 5.69E+17 |
| 8 | Diesel | 1.08E+08 | J | 6.60E+12 | 7.13E+20 |
| 9 | Lubricantes | 3.21E+05 | J | 6.60E+12 | 2.12E+18 |
| MAQUINARIA Y EQUIPO | | | | | |
| 10 | Tractor de orugas CAT. D8R, 305 HP, 37580 KG. | 1.30E+02 | g | 6.70E+00 | 8.74E+02 |
| 11 | Excavadora Hidráulica CAT. 320 C, 138 HP, 19700 Kg, 0.45-1.5 M3. | 1.52E+02 | g | 6.70E+09 | 1.02E+12 |
| 12 | Motoniveladora CAT. 120 H de 140 HP, 15906 kg | 1.10E+02 | g | 6.70E+09 | 7.40E+11 |
| 13 | Vehículo con sistema PIPA de 10 M3, 156.45 KW, DIESEL, 15875 KG | 2.76E+01 | g | 6.70E+09 | 1.85E+11 |
| 14 | Camión de VOLTEO de 7 M3. | 8.33E+01 | g | 6.70E+09 | 5.58E+11 |
| 15 | Vibro compactador VAP 70 33.8 HZ, 0-14.5 KM/H, 7.03 TON | 1.22E+01 | g | 6.70E+09 | 8.15E+10 |
| 16 | Dosificadora EE-300DT DOBLE TOLVA BASE CEMENTADA 450 TONS/HR, 11 M3, 7.5 P, 25 TON | 6.43E+00 | g | 6.70E+09 | 4.31E+10 |
| SERVICIOS | | | | | |
| 17 | Mano de obra | 4.19E+06 | J | 4.77E+06 | 2.00E+13 |
| 18 | Mantenimiento y seguro | 9.46E-01 | \$ | 4.59E+13 | 4.34E+13 |

Tabla 13 Cuantificación para el cálculo de eMergía Solar

Cuantificación para el cálculo de eMergía Solar

Energía solar

| | | |
|----------------------------|---|---------------------------|
| Superficie de trabajo = | 8000 | m ² |
| Insolación = | 1.57E+02 | kcal/cm ² /año |
| Albedo = | 0.30 | Fracción decimal |
| Energía (J) = | (Superficie de trabajo*insolación*(1-Albedo) | |
| Energía total (J) = | 8.79E+05 | |

Tabla 14 Cuantificaciones para el cálculo de eMergía de maquinaria

Cuantificación para el cálculo de eMergía de maquinaria

Tractor de orugas CAT. D8R, 305 HP, 37 580 kg.

| | | |
|-------------------------------------|---|----------------|
| Peso total del equipo = | 37580 | kg |
| Peso del equipo gramos = | 37580000 | g |
| Vida útil del equipo = | 5 | años |
| Rendimiento por jornada (8 horas) = | 200 | m ³ |
| Depreciación del equipo = | 1 / (Vida útil * 12 meses * 4 sem * 6 días * Rendimiento por jornada) | |
| | 3.47222E- | |
| Depreciación del equipo = | 06 | |
| Energía (J) = | Peso del equipo (g) * Depreciación del equipo | |
| Energía (J) = | 1.30E+02 | |

Excavadora hidráulica CAT. 320 C, 138 HP, 19 700 Kg, 0.45-1.5 m³.

| | | |
|-------------------------------------|---|----------------|
| Peso total del equipo = | 19700 | kg |
| Peso del equipo gramos = | 19700000 | g |
| Vida útil del equipo = | 5 | años |
| Rendimiento por jornada (8 horas) = | 90 | m ³ |
| Depreciación del equipo = | 1 / (Vida útil * 12 meses * 4 sem * 6 días * Rendimiento por jornada) | |
| | 7.71605E- | |
| Depreciación del equipo = | 06 | |
| Energía (J) = | Peso del equipo (g) * Depreciación del equipo | |
| Energía (J) = | 1.52E+02 | |

Motoniveladora CAT. 120 H de 140 HP, 15 906 kg.

Peso total del equipo = 15906 kg
Peso del equipo gramos = 15906000 g
Vida útil del equipo = 5 años
Rendimiento por jornada (8 horas) = 100 m³
1 / (Vida útil * 12 meses * 4 sem * 6 días * Rendimiento por jornada)
Depreciación del equipo = 6.94444E-06
Depreciación del equipo = 06
Energía (J) = Peso del equipo (g) * Depreciación del equipo

Energía (J) = 1.10E+02

Vehículo con cisterna PIPA de 10 M3, 156.45 KW, DIESEL, 15 875 kg.

Peso total del equipo = 15875 kg
Peso del equipo gramos = 15875000 g
Vida útil del equipo = 5 años
Rendimiento por jornada (8 horas) = 400 m³
1 / (Vida útil * 12 meses * 4 sem * 6 días * Rendimiento por jornada)
Depreciación del equipo = 1.73611E-06
Depreciación del equipo = 06
Energía (J) = Peso del equipo (g) * Depreciación del equipo

Energía (J) = 2.76E+01

Camión de VOLTEO de 7 m3, 6 000 kg.

Peso total del equipo = 6000 kg
Peso del equipo gramos = 6000000 g
Vida útil del equipo = 5 años
Rendimiento por jornada (8 horas) = 50 m³
1 / (Vida útil * 12 meses * 4 sem * 6 días * Rendimiento por jornada)
Depreciación del equipo = 1.38889E-05
Depreciación del equipo = 05
Energía (J) = Peso del equipo (g) * Depreciación del equipo

Energía (J) = 8.33E+01

Vibro compactador VAP 70 33.8 HZ, 0-14.5 KM/H, 7 003 kg.

| | |
|-------------------------------------|---|
| Peso total del equipo = | 7003 kg |
| Peso del equipo gramos = | 7003000 g |
| Vida útil del equipo = | 5 años |
| Rendimiento por jornada (8 horas) = | 400 m ³ |
| | 1 / (Vida útil * 12 meses * 4 sem * 6 días * Rendimiento por jornada) |
| Depreciación del equipo = | 1.73611E-06 |
| Depreciación del equipo = | 06 |
| Energía (J) = | Peso del equipo (g) * Depreciación del equipo |
| Energía (J) = | 1.22E+01 |

Dosificadora EE-300DT DOBLE TOLVA BASE CEMENTADA 450 TONS/HR, 11 M3, 7.5 P, 25 000 kg.

| | |
|-------------------------------------|---|
| Peso total del equipo = | 25000 kg |
| Peso del equipo gramos = | 25000000 g |
| Vida útil del equipo = | 5 años |
| Rendimiento por jornada (8 horas) = | 2700 m ³ |
| | 1 / (Vida útil * 12 meses * 4 sem * 6 días * Rendimiento por jornada) |
| Depreciación del equipo = | 2.57202E-07 |
| Depreciación del equipo = | 07 |
| Energía (J) = | Peso del equipo (g) * Depreciación del equipo |
| Energía (J) = | 6.43E+00 |

Posteriormente, con las tablas de análisis de eMergía basada en los diagramas, se calcularon los índices de carga ambiental (ELR) y de sustentabilidad ambiental (ESI) de los suelos estabilizados con cal y suelos estabilizados con PA. El análisis señala que el suelo estabilizado con cal presentó un mayor ELR con un valor de 8.9577 comparado con el suelo estabilizado PA con 8.9240. Estos valores son relevantes para demostrar en qué medida la estabilización con cal atenta contra el medio ambiente. La comparación de

Carga Ambiental ejercida por las alternativas planteadas es presentada en la Figura 61. En el ESI se indica la contribución del medio natural, es decir el trabajo energético que realizan los ecosistemas para la generación de procesos sobre la carga ambiental. Según Brown y Ulgiati [144], valores de ESI inferiores a 1 indican sistemas que consumen recursos y están asociados a economías altamente desarrolladas y orientadas para el consumo. Los valores reportados en este estudio indican que PA (0.2376) es mayor que Cal (0.2363), siendo PA el que afecta en menor grado el equilibrio del medio ambiente; por lo tanto, es más sostenible ambientalmente que Cal. En la Figura 61 puede observarse la comparación gráfica de los resultados obtenidos para cada alternativa referente al ESI.

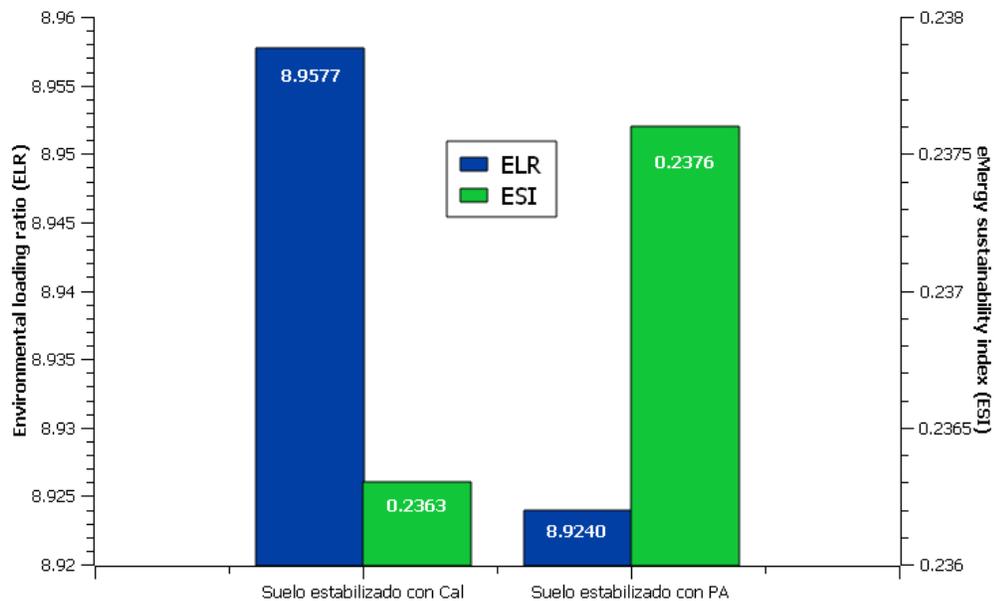


Figura 61 Índice de carga ambiental e Índice de sustentabilidad ambiental para suelo estabilizado con cal comparado con un suelo estabilizado con PA

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

La presente investigación sobre suelos modificados estabilizados con puzolanas naturales activadas alcalinamente para técnicas de construcción con tierra ofrece una alternativa viable que busca reducir la carga ambiental sin sacrificar las propiedades mecánicas y durabilidad. Los resultados obtenidos en esta investigación confirman que los suelos tratados con la puzolana natural activada alcalinamente muestran una mejora significativa en parámetros como la resistencia a compresión y la durabilidad frente a los suelos estabilizados con cal convencional.

A través de la caracterización física (granulometría, límites de Atterberg, densidad) y química (FRX y DRX) de los materiales, se pudo establecer la relación e importancia entre las propiedades físicas y químicas de diferentes suelos para su selección. Se determinó que ciertas propiedades físicas, como la granulometría y consistencia, están estrechamente vinculadas a la composición mineralógica de los suelos, identificada mediante análisis de FRX (Fluorescencia de Rayos X) y DRX (Difracción de Rayos X). Los análisis revelaron, que el suelo B1 Zayre, con un contenido de sílice del 67.77% y presencia de montmorillonita, mostró una granulometría fina y una alta cohesión, lo que se correlaciona con una mayor cohesión y menor expansión, características cruciales para su estabilidad natural, es decir sin estabilizantes, que lo hacen particularmente adecuado en técnicas de construcción con tierra como los bloques de tierra comprimida (BTC). En contraste, B5 Cerritos, con un 52.16% de calcio y fases dominantes de dolomita, presentó una granulometría gruesa y alta resistencia para su aplicación en terracerías,

particularmente en la subrasante, demostrando su capacidad portante en el ensayo de CBR (California Bearing Ratio) al 90% de compactación, alcanzando un valor superior al 28%.

Los resultados en términos de resistencia a compresión de los suelos estabilizados fueron particularmente reveladores. En los suelos naturales (sin estabilizantes), B3M presentó la mayor resistencia a compresión, debido a su granulometría equilibrada y consistencia óptima en los límites de Atterberg. En muestras estabilizadas se evidenció una clara mejora al adicionar PA, con B1Z con el 10% de PA se alcanzaron resistencias a la compresión de 30 kg/cm² a 7 días y 100 kg/cm² a 180 días de curado, un valor superior al registrado en suelos estabilizados con el 10% de cal, que rondaban los 16 y 60 kg/cm² respectivamente, en las mismas condiciones de curado. Desde el punto de vista normativo, los resultados obtenidos en esta investigación superan los rangos de resistencia a compresión establecidos en el punto 7.6 de la norma mexicana NMX-C-508-ONNCCE 2015 para BTC estabilizados con cal. La estabilización con puzolanas activadas alcalinamente permite alcanzar resistencias significativamente superiores a estos parámetros, consolidando su viabilidad como material estructural en muros de carga y elementos divisorios. Estos resultados demuestran que la interacción entre la montmorillonita, que tiene un alto potencial de intercambio catiónico, y los productos de reacción generados por la activación alcalina de la puzolana natural como estabilizante, contribuyen a una red de enlaces más estables desde edades tempranas.

Por último, desde el punto de vista de sostenibilidad, los resultados de la contabilidad ambiental (memoria energética) utilizando los índices ELR (Environmental Load Ratio) y ESI (Emergy Sustainability Index) son claros. Los resultados obtenidos en esta investigación confirman que ambos métodos de estabilización (cal y PA) presentan

ESI por debajo de 1, lo que refleja un consumo significativo de recursos en ambos casos. Sin embargo, el suelo estabilizado con PA reporta un valor de ESI superior en comparación con el suelo estabilizado con cal, lo que indica que, si bien ambos sistemas operan dentro de economías que tienden al consumo, el uso de puzolanas naturales activadas alcalinamente representa una opción más sostenible. Aunque los valores de ELR y ESI son cercanos, la diferencia en el impacto ambiental adquiere relevancia cuando se analiza en un contexto más amplio de sostenibilidad. Los resultados obtenidos en términos de resistencia a compresión, oposición a la deformación y durabilidad demuestran que los suelos estabilizados con PA presentan un rendimiento superior en comparación con aquellos estabilizados con cal. Esto posiciona a las puzolanas activadas como una opción técnica y ambientalmente más favorable y evidencia la necesidad de repensar las prácticas convencionales en la construcción, adoptando soluciones innovadoras más alineadas con el fin de mitigar los efectos adversos sobre el medio ambiente y fomentar el desarrollo de técnicas constructivas más eficientes y responsables.

En conclusión, los suelos estabilizados con puzolanas naturales activadas alcalinamente no solo ofrecen ventajas técnicas en términos de durabilidad y resistencia, sino que también representan una solución más sostenible y ecológica en comparación con los estabilizantes convencionales. Los datos obtenidos demuestran que es posible desarrollar materiales de construcción eficaces y con un menor impacto ambiental. No obstante, es crucial reconocer que la optimización de los procesos y recursos para la activación alcalina de las puzolanas naturales aún constituye un área prioritaria de investigación, dado que la mejora en la eficiencia de estos no solo podría incrementar las propiedades mecánicas del material, sino también reduciría aún más su impacto ambiental.

En consecuencia, es recomendable realizar estudios adicionales para validar su uso en diversas regiones y bajo diferentes condiciones, así como profundizar en explorar la optimización de recursos. Esta investigación abre una vía hacia una construcción más sostenible, acorde con los desafíos actuales de sostenibilidad global.

5.2 Recomendaciones

- Optimización del proceso de activación alcalina: Se recomienda profundizar en la optimización de la activación alcalina de las puzolanas naturales para mejorar su reactividad y eficiencia en la estabilización de suelos. Estudios adicionales podrían evaluar el efecto de diferentes concentraciones y tipos de activadores alcalinos para eficientizar y/o maximizar la resistencia mecánica y la durabilidad de los materiales estabilizados.
- Ampliación del estudio a otras regiones y tipos de suelo: Es necesario realizar estudios en diferentes tipos de suelo y condiciones climáticas para evaluar la aplicabilidad de la estabilización con puzolanas activadas en diversas regiones. Esto permitirá determinar los rangos óptimos de aplicación y adaptar las estrategias de estabilización a distintas condiciones geotécnicas y ambientales.
- Evaluación del comportamiento a largo plazo: Se sugiere realizar ensayos de durabilidad a mayor plazo, incluyendo pruebas con agentes químicos agresivos, con el fin de validar la estabilidad del sistema en condiciones extremas y su desempeño estructural en aplicaciones reales.
- Análisis de viabilidad económica: Para una mayor implementación en la industria de la construcción, se recomienda realizar estudios de viabilidad económica comparativa entre la estabilización con puzolanas activadas y los métodos

convencionales (cal y cemento). Esto permitirá evaluar el costo-beneficio y facilitar la toma de decisiones para su aplicación en proyectos de construcción sostenibles.

- Desarrollo de normativas y estándares técnicos: Se recomienda fomentar la creación o actualización de normativas técnicas que regulen el uso de puzolanas naturales activadas alcalinamente en la estabilización de suelos. Esto permitiría estandarizar los procedimientos de diseño, caracterización y control de calidad, facilitando su aceptación en la industria de la construcción.

5.3 Productos generados

- Publicación internacional del artículo: Effect of Physical, Chemical, and Mineralogical Properties for Selection of Soils Stabilized by Alkaline Activation of a Natural Pozzolan for Earth Construction Techniques such as Compressed Earth Blocks.

C. A. Laguna-Torres¹ (ORCID: 0000-0002-2356-877X), J. R. González-López¹ (ORCID: 0000-0003-0887-1292), M. Á. Guerra-Cossío¹ (ORCID: 0000-0003-0336-5112), L. F. Guerrero-Baca² (ORCID: 0000-0001-8256-4851), L. Chávez-Guerrero³ (ORCID: 0000-0002-6186-2240), M. Z. Figueroa-Torres¹ (ORCID: 0000-0002-6823-7384), A. A. Zaldívar-Cadena¹ (ORCID:0000-0002-7216-2557). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135449> Construction and Building Materials.

- Patente. Solicitud aceptada No. MX-a-2023-009407 en la Coordinación de Propiedad Industrial del CIETT Centro de Incubación de Empresas y Transferencia de Tecnología de la UANL para la evaluación y protección del

proyecto de investigación científica, denominado “Suelos modificados y estabilizados a través de puzolanas naturales activadas alcalinamente para técnicas de construcción con tierra y terracerías”.

- Aceptación y participación. Presentación oral en el 2do. y 3er. Encuentro de Ciencia, Tecnología e Ingeniería de Estudiantes de Posgrado, con los trabajos: “BTC Bloques de Tierra Comprimida Modificados y Estabilizados a través de Puzolanas Naturales” y “Suelos estabilizados a través de puzolanas naturales activadas alcalinamente para técnicas de construcción con tierra”.
- Aceptación y participación. Ponente en XXX International Materials Research Congress and International Conference on Advanced Materials en Cancún, Q. Roo., México. Con la contribución: Stabilized soils through alkali-activated natural pozzolans for construction techniques with earth in buildings and earthworks as an alternative for sustainable construction (classification, characterization and selection).
- Aceptación y participación en la “Escuela de Verano ARQUITECTURA DE TIERRA” por parte de la Red Conexión ArchaeologyHub CSIC por el proyecto: Suelos modificados y estabilizados a través de puzolanas naturales activadas alcalinamente para técnicas de construcción con tierra. Cancho Roano (Zalamea de la Serena, Badajoz. España).
- Aceptación y participación en el 11th Biennial Conference Energy & Environmental Accounting con el trabajo: Energy analysis for stabilized soils with pozzolans and lime for sustainable road construction. Gainesville, Florida.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] K.A.J. Ouedraogo, J.-E. Aubert, C. Tribout, G. Escadeillas, Is stabilization of earth bricks using low cement or lime contents relevant?, *Constr Build Mater* 236 (2020) 117578. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117578>.
- [2] V. Maniatidis, P. Walker, B. Swaney, C. Harris, C. Williams, D. Sheppard, G. Pearson, J. Renwick, J. Brewis, K. Cheng, F. Chalmers, M. Lovell, M. Waters, F. Westmoreland, I. West, M.H. Roberts, S. Cox, S. Farley, N. Barnes, N. Phillips, P. Borer, P. Clegg, P. Trotman, R. Keable, T. Hewitt, A Review of Rammed Earth Construction for DTi Partners in Innovation Project “Developing Rammed Earth for UK Housing,” 2003.
- [3] R. Firdous, D. Stephan, J.N.Y. Djobo, Natural pozzolan based geopolymers: A review on mechanical, microstructural and durability characteristics, *Constr Build Mater* 190 (2018) 1251–1263. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.191>.
- [4] R. Siddique, Effect of volcanic ash on the properties of cement paste and mortar, *Resour Conserv Recycl* 56 (2011) 66–70. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.09.005>.
- [5] J. Tailby, K.J.D. MacKenzie, Structure and mechanical properties of aluminosilicate geopolymer composites with Portland cement and its constituent minerals, *Cem Concr Res* 40 (2010) 787–794. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.12.003>.

- [6] C. Villa, E.T. Pecina, R. Torres, L. Gómez, Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite, *Constr Build Mater* 24 (2010) 2084–2090. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.052>.
- [7] Roux-Gutiérrez Rubén Salvador, Velázquez Lozano Jesús, Compressed earth blocks, their thermal lag and environmental impact, *Revista Legado de Arquitectura y Diseño*, Núm. 19, 2016. Universidad Autónoma Del Estado de México (2015).
- [8] K.T. Arteaga Medina, Ó.H. Medina, Ó.J. Gutiérrez junco, Bloque de tierra comprimida como material constructivo, *Facultad de Ingeniería* 20 (2011) 55–68. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=413940770005>.
- [9] NMX-C-508-ONNCCE-2015, Industria de la Construcción - Bloques de Tierra Comprimida Estabilizados con Cal - Especificaciones y Métodos de Ensayo, 2015.
- [10] International Energy Agency (IEA), *Transport Energy and CO2 : Moving towards Sustainability*, OECD, 2009. <https://doi.org/10.1787/9789264073173-en>.
- [11] B. Peng, C. Cai, G. Yin, W. Li, Y. Zhan, Evaluation system for CO2 emission of hot asphalt mixture, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* 2 (2015) 116–124. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2015.02.005>.
- [12] Y. Shan, Z. Liu, D. Guan, CO2 emissions from China's lime industry, *Appl Energy* 166 (2016) 245–252. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.091>.
- [13] P. Kumar Mehta, *Reducing the Environmental Impact of Concrete*, 2001.

- [14] J. Fábregas, F. Maña, E. Vázquez, *Construcció i medi ambient. Medi ambient i tecnologia–Guia ambiental de la UPC–Universitat Politècnica de Catalunya*, Edicions UPC (1998) 141–152.
- [15] Teran. Cáceres, A. Johanna, *Desenvolupament Sostenible - Desarrollo Sostenible*, Revista Tracte (1996).
- [16] M. Wassouf, *De la casa pasiva al estándar Passivhaus: La arquitectura pasiva en climas cálidos*, Editorial GG, 2014.
- [17] P. Alavedra, J. Domínguez, E. Gonzalo, J. Serra, *La construcción sostenible: el estado de la cuestión*, *Informes de La Construcción* 49 (1997) 41–47.
<https://doi.org/10.3989/ic.1997.v49.i451.936>.
- [18] G.A. Valdés, J.G. Rapimán, *Propiedades Físicas y Mecánicas de Bloques de Hormigón Compuestos con Áridos Reciclados*, *Información Tecnológica* 18 (2007) 81–88. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642007000300010>.
- [19] E. Avrami, H. Guillaud, M. Hardy, *Terra Literature Review: An Overview of Research in Earthen Architecture Conservation*, 2008.
- [20] R.A. Burt, G. Minke, C. Williams-Ellis, *Earth Construction Handbook: The Building Material Earth in Modern Architecture*, *APT Bulletin* 32 (2001) 58.
<https://doi.org/10.2307/1504775>.
- [21] G. Minke, *Lehmbau-Handbuch Manual de Construcción en Tierra. La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual, Fin de Siglo*, Alemania, 2001.

- [22] A. Vásquez Hernandez, L.F. Botero Botero, D. Carvajal Arango, Fabricación de bloques de tierra comprimida con adición de residuos de construcción y demolición como reemplazo del agregado pétreo convencional, *Ing Cienc* 11 (2015) 197–220. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.11.21.10>.
- [23] C. Neves, *Arquitectura y construcción con tierra: Pasado, hoy y futuro*, Anuario de Investigación de Construcción Con Tierra y Del Diseño Sustentable. Editorial Universidad Autónoma de Tamaulipas. México. (2007).
- [24] D. Gallipoli, A. Bruno, C. Perlot, *Unsaturated Soils: Research & Applications*, CRC Press, 2014. <https://doi.org/10.1201/b17034>.
- [25] K.T. Arteaga Medina, Ó.H. Medina, Ó.J. Gutiérrez junco, Bloque de tierra comprimida como material constructivo, *Facultad de Ingeniería* 20 (2011) 55–68. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=413940770005>.
- [26] Adobe Association of the Sothwest, *Proceedings Fourth Internacional Adobe Conference of the Adobe Association of the Southwest, United State*, 2007.
- [27] H. van Damme, H. Houben, Earth concrete. Stabilization revisited, *Cem Concr Res* 114 (2018) 90–102. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.035>.
- [28] B.L. Damineli, F.M. Kemeid, P.S. Aguiar, V.M. John, Measuring the eco-efficiency of cement use, *Cem Concr Compos* 32 (2010) 555–562. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.009>.
- [29] H. Houben, H. Guillaud, *Traité de construction en terre*, 3e ed., Éditions Parenthèses, 2006.

- [30] E. Hamard, B. Cazacliu, A. Razakamanantsoa, J.-C. Morel, Cob, a vernacular earth construction process in the context of modern sustainable building, *Build Environ* 106 (2016) 103–119. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.009>.
- [31] F. Massada, Pozzolana and Pozzolanic Cements, in: 4th Edition, Elsevier, 2003: pp. 471–635. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-6256-7.X5007-3>.
- [32] ASTM-C-618-12, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, 2012. <https://doi.org/10.1520/C0618-12>.
- [33] Q. Yuan, Z. Liu, K. Zheng, C. Ma, Portland cement concrete, in: *Civil Engineering Materials*, Elsevier, 2021: pp. 59–204. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822865-4.00003-9>.
- [34] H.A. Guillén, *Sustainability of Ecotourism and Traditional Agricultural Practices in Chiapas*, University of Florida, 1998.
- [35] L. von Bertalanffy, *General system theory: Foundations, development, applications*, (1969).
- [36] A.J. Lotka, Contribution to the Energetics of Evolution, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 8 (1922) 147–151. <https://doi.org/10.1073/pnas.8.6.147>.
- [37] H.T.& O.E.C. Odum, *Energy Analysis Overview of Nations*, IIASA Working Paper. IIASA, Laxenburg, Austria: WP-83-082 (1983).
- [38] E.P. Odum, G.W. Barrett, *Fundamentals of Ecology*, 5th ed., Thomson Brooks/Cole, 2005. <https://books.google.com.mx/books?id=vC9FAQAIAAJ>.

- [39] H.T. Odum, Self organization, transformity and information. Science, 1998.
- [40] E. Bravo Amarante, E. López Bastida, O. Romero Romero, The eMergy as an indicator of ecological economy to measure sustainability, UNIVERSIDAD Y SOCIEDAD | Revista Científica de La Universidad de Cienfuegos (2018).
- [41] M.T. Brown, S. Ulgiati, Energy quality, emergy, and transformity: H.T. Odum's contributions to quantifying and understanding systems, Ecol Modell 178 (2004) 201–213. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.03.002>.
- [42] L.M. Reynosa Morales, Valoración técnico-ambiental en la producción de concreto hidráulico para pavimentos urbanos usando eMergía, en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, Universidad Juárez del Estado de Durango, 2017.
- [43] P. Lomas, Aportaciones de la síntesis emergética a la evaluación multi-escalar del empleo de los servicios de los ecosistemas a través de casos de estudio, 2009.
- [44] G. Zhang, W. Long, A key review on emergy analysis and assessment of biomass resources for a sustainable future, Energy Policy 38 (2010) 2948–2955. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.01.032>.
- [45] M.T. Brown, M. Raugei, S. Ulgiati, On boundaries and 'investments' in Emergy Synthesis and LCA: A case study on thermal vs. photovoltaic electricity, Ecol Indic 15 (2012) 227–235. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.09.021>.
- [46] R.H. Bennett, M.H. Hulbert, Clay Microstructure, Springer Netherlands, Dordrecht, 1986. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-4684-2>.

- [47] P.S. Nayak, B.K. Singh, Instrumental characterization of clay by XRF, XRD and FTIR, *Bulletin of Materials Science* 30 (2007) 235–238. <https://doi.org/10.1007/s12034-007-0042-5>.
- [48] M.F. Brigatti, E. Galan, B.K.G. Theng, Chapter 2 Structures and Mineralogy of Clay Minerals, in: 2006: pp. 19–86. [https://doi.org/10.1016/S1572-4352\(05\)01002-0](https://doi.org/10.1016/S1572-4352(05)01002-0).
- [49] UNE-41410-2008, Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo, 2018.
- [50] NTC-5324-2004, Bloques de suelo cemento para muros y divisiones. Definiciones. Especificaciones. Métodos de ensayo. Condiciones de entrega, 2004.
- [51] NMX-C-431-ONNCCE-2003, Industria de la Construcción - Geotecnia Cimentaciones - Toma de Muestra Alterada e Inalterada - Métodos de Prueba, 2003.
- [52] NMX-C-468-ONNCCE-2018, Industria de la Construcción - Geotecnia - Materiales Térreos - Método de Preparación de Muestras, 2018.
- [53] NMX-C-496-ONNCCE-2014, Industria de la Construcción - Geotecnia - Materiales para Terracerías - Determinación de la Composición Granular, 2014.
- [54] NMX-C-493-ONNCCE-2018, Industria de la Construcción - Geotecnia - Límites de Consistencia de Suelos - Método de Ensayo, 2018.

- [55] NMX-C-476-ONNCCE-2013, Industria de la Construcción - Geotecnia - Materiales para Terracerías - Compactación Dinámica Estándar y Modificada - Métodos de Ensayo, 2013.
- [56] NMX-C-522-ONNCCE-2016, Industria de la Construcción - Geotecnia - Materiales Térreos - Determinación del Valor Soporte de California de Suelos y Expansión en Laboratorio - Método de Ensayo, 2016.
- [57] J.S. Damtoft, J. Lukasik, D. Herfort, D. Sorrentino, E.M. Gartner, Sustainable development and climate change initiatives, *Cem Concr Res* 38 (2008) 115–127. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.008>.
- [58] F.A.M. Yusuf, D.N. Little, S.L. Sarkar, Evaluation of Structural Contribution of Lime Stabilization of Subgrade Soils in Mississippi, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1757 (2001) 22–31. <https://doi.org/10.3141/1757-03>.
- [59] P. Sargent, The development of alkali-activated mixtures for soil stabilisation, in: *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*, Elsevier, 2015: pp. 555–604. <https://doi.org/10.1533/9781782422884.4.555>.
- [60] A. Behnood, Soil and clay stabilization with calcium- and non-calcium-based additives: A state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques, *Transportation Geotechnics* 17 (2018) 14–32. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.08.002>.
- [61] M. Konstadinou, G. Herrier, T. Stoutjesdijk, F. Losma, C. Zwanenburg, R. Dobbe, Lime Treatment: Evaluation for Use in Dike Applications in the Netherlands,

Journal of Materials in Civil Engineering 35 (2023).

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004623](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004623).

- [62] M. Braja, Principios de Ingeniería de Cimentaciones, Cengage Learning Editores S.A. De C.V., 2006.
- [63] C. Vizcayno, R.M. de Gutiérrez, R. Castello, E. Rodriguez, C.E. Guerrero, Pozzolan obtained by mechanochemical and thermal treatments of kaolin, Appl Clay Sci 49 (2010) 405–413. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.09.008>.
- [64] R. Almenares, A. Alujas, J. Martirena, C. Leyva, S. Betancourt, F. Arcial, Identification and assessment of kaolinitic clays for the production of ternary cement LC3 and active mineral admixtures LC2, Academia de Ciencias de Cuba 11 (2021).
- [65] S. Kenai, R. Bahar, M. Benazzoug, Experimental analysis of the effect of some compaction methods on mechanical properties and durability of cement stabilized soil, J Mater Sci 41 (2006) 6956–6964. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0226-1>.
- [66] R. Bahar, M. Benazzoug, S. Kenai, Performance of compacted cement-stabilised soil, Cem Concr Compos 26 (2004) 811–820. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.01.003>.
- [67] D. Ciancio, J. Gibbings, Experimental investigation on the compressive strength of cored and molded cement-stabilized rammed earth samples, Constr Build Mater 28 (2012) 294–304. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.070>.

- [68] Z. Ji-ru, C. Xing, Stabilization of expansive soil by lime and fly ash, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 17 (2002) 73–77. <https://doi.org/10.1007/BF02838423>.
- [69] S. Kumar, Fly ash-lime-phosphogypsum cementitious binder: A new trend in bricks, *Mater Struct* 33 (2000) 59–64. <https://doi.org/10.1007/BF02481697>.
- [70] A. Basumajumdar, A.K. Das, N. Bandyopadhyay, S. Maitra, Some studies on the reaction between fly ash and lime, *Bulletin of Materials Science* 28 (2005) 131–136. <https://doi.org/10.1007/BF02704232>.
- [71] S. Maitra, F. Ahmad, A.K. Das, S. Das, B.K. Dutta, Effect of curing conditions and ionic additives on properties of fly ash-lime compacts, *Bulletin of Materials Science* 33 (2010) 185–190. <https://doi.org/10.1007/s12034-010-0026-8>.
- [72] D. Maskell, A. Heath, P. Walker, Inorganic stabilisation methods for extruded earth masonry units, *Constr Build Mater* 71 (2014) 602–609. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.094>.
- [73] P. Matias, G. Maura, G. Rinaldi, Investigation of reactions in high-alumina fly ash and lime pastes, *Mater Struct* 22 (1989) 287–291.
- [74] Y. Millogo, J.-C. Morel, Microstructural characterization and mechanical properties of cement stabilised adobes, *Mater Struct* 45 (2012) 1311–1318. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9833-2>.

- [75] J.-C. Morel, A. Pkla, P. Walker, Compressive strength testing of compressed earth blocks, *Constr Build Mater* 21 (2007) 303–309. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.021>.
- [76] F. Riza, I. Abdul Rahman, A. Zaidi, Preliminary study of compressed stabilized earth brick (CSEB), *Aust J Basic Appl Sci* 5 (2011) 6–12.
- [77] S. Serrano, C. Barreneche, L. Rincón, D. Boer, L.F. Cabeza, Stabilized rammed earth incorporating PCM: Optimization and improvement of thermal properties and Life Cycle Assessment, *Energy Procedia* 30 (2012) 461–470. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.055>.
- [78] N.K. Sharma, S.K. Swain, U.C. Sahoo, Stabilization of a Clayey Soil with Fly Ash and Lime: A Micro Level Investigation, *Geotechnical and Geological Engineering* 30 (2012) 1197–1205. <https://doi.org/10.1007/s10706-012-9532-3>.
- [79] B. V Venkatarama Reddy, K. Gourav, Strength of lime-fly ash compacts using different curing techniques and gypsum additive, *Mater Struct* 44 (2011) 1793–1808.
- [80] B. V. Venkatarama Reddy, S.R. Hubli, Properties of lime stabilised steam-cured blocks for masonry, *Mater Struct* 35 (2002) 293–300. <https://doi.org/10.1007/BF02482135>.
- [81] P. Walker, T. Stace, Properties of some cement stabilised compressed earth blocks and mortars, *Mater Struct* (1997) 545–551.

- [82] D. Gupta, A. Kumar, Performance evaluation of cement-stabilized pond ash-rice husk ash-clay mixture as a highway construction material, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 9 (2017) 159–169. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.05.010>.
- [83] G. Radhakrishnan, M. Anjan Kumar, G.V.R.P. Raju, Laboratory Evaluation of the Effects of 3-Chloride Compounds on the Geotechnical Properties of an Expansive Subgrade Soil, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A* 98 (2017) 477–482. <https://doi.org/10.1007/s40030-017-0233-z>.
- [84] A. Kumar, D. Gupta, Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced pond ash, rice husk ash–soil mixtures, *Geotextiles and Geomembranes* 44 (2016) 466–474. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.07.010>.
- [85] S.S.D. Raavi, D.D. Tripura, Predicting and evaluating the engineering properties of unstabilized and cement stabilized fibre reinforced rammed earth blocks, *Constr Build Mater* 262 (2020) 120845. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120845>.
- [86] A.Z. Khalifa, Ö. Cizer, Y. Pontikes, A. Heath, P. Patureau, S.A. Bernal, A.T.M. Marsh, Advances in alkali-activation of clay minerals, *Cem Concr Res* 132 (2020) 106050. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106050>.
- [87] A. Marsh, A. Heath, P. Patureau, M. Evernden, P. Walker, Stabilisation of Clay Mixtures and Soils by Alkali Activation, in: 2019: pp. 15–26. https://doi.org/10.1007/978-981-13-5883-8_2.

- [88] A. Marsh, A. Heath, P. Patureau, M. Evernden, P. Walker, Phase formation behaviour in alkali activation of clay mixtures, *Appl Clay Sci* 175 (2019) 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.03.037>.
- [89] A. Marsh, A. Heath, P. Patureau, M. Evernden, P. Walker, Alkali activation behaviour of un-calcined montmorillonite and illite clay minerals, *Appl Clay Sci* 166 (2018) 250–261. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.09.011>.
- [90] R. Aurelie Tchouateu Kamwa, L. Tchadjie Noubissie, S. Tome, E. Idriss, J. Giogetti Deutou Nemaleu, B. Tommes, D. Woschko, C. Janiak, M.-A. Etoh, A comparative study of compressed lateritic earth bricks stabilized with natural pozzolan-based geopolymer binders synthesized in acidic and alkaline conditions, *Constr Build Mater* 400 (2023) 132652. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132652>.
- [91] ASTM-D-6276-99a, Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization, 2017.
- [92] P. Nshimiyimana, N. Fagel, A. Messan, D.O. Wetshondo, L. Courard, Physico-chemical and mineralogical characterization of clay materials suitable for production of stabilized compressed earth blocks, *Constr Build Mater* 241 (2020) 118097. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118097>.
- [93] P. Nshimiyimana, D. Miraucourt, A. Messan, L. Courard, Calcium Carbide Residue and Rice Husk Ash for improving the Compressive Strength of Compressed Earth Blocks, in: *MRS Adv*, Materials Research Society, 2018: pp. 2009–2014. <https://doi.org/10.1557/adv.2018.147>.

- [94] F.E. Jalal, Y. Xu, B. Jamhiri, S.A. Memon, On the Recent Trends in Expansive Soil Stabilization Using Calcium-Based Stabilizer Materials (CSMs): A Comprehensive Review, *Advances in Materials Science and Engineering* 2020 (2020) 1–23. <https://doi.org/10.1155/2020/1510969>.
- [95] P. Kasinikota, D.D. Tripura, Evaluation of compressed stabilized earth block properties using crushed brick waste, *Constr Build Mater* 280 (2021) 122520. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122520>.
- [96] A. AlArab, B. Hamad, G. Chehab, J.J. Assaad, Use of Ceramic-Waste Powder as Value-Added Pozzolanic Material with Improved Thermal Properties, *Journal of Materials in Civil Engineering* 32 (2020). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003326](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003326).
- [97] H.T. Odum, *Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making*, 1st ed., Wiley, 1995.
- [98] D.M. González-García, L. Téllez-Jurado, F.J. Jiménez-Álvarez, H. Balmori-Ramírez, Structural study of geopolymers obtained from alkali-activated natural pozzolan feldspars, *Ceram Int* 43 (2017) 2606–2613. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.11.070>.
- [99] D.M. González-García, L. Téllez-Jurado, F.J. Jiménez-Álvarez, L. Zarazua-Villalobos, H. Balmori-Ramírez, Evolution of a natural pozzolan-based geopolymer alkalized in the presence of sodium or potassium silicate/hydroxide solution, *Constr Build Mater* 321 (2022) 126305. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126305>.

- [100] M.T. Marvila, A.R.G. de Azevedo, C.M.F. Vieira, Reaction mechanisms of alkali-activated materials, *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais* 14 (2021). <https://doi.org/10.1590/s1983-41952021000300009>.
- [101] L.B. de Oliveira, A.R.G. de Azevedo, M.T. Marvila, E.C. Pereira, R. Fediuk, C.M.F. Vieira, Durability of geopolymers with industrial waste, *Case Studies in Construction Materials* 16 (2022) e00839. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00839>.
- [102] Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes, Elsevier, 2015. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-16511-7>.
- [103] A. Ahmed, Chemical Reactions in Pozzolanic Concrete, *Modern Approaches on Material Science* 1 (2019). <https://doi.org/10.32474/MAMS.2019.01.000120>.
- [104] J. Ninov, I. Doykov, L. Dimova, B. Petrov, L. Brakalov, On the kinetics of pozzolanic reaction in metakaolin–lime–water system, *J Therm Anal Calorim* 105 (2011) 245–250. <https://doi.org/10.1007/s10973-011-1419-7>.
- [105] N.M. Boeva, Yu.I. Bocharnikova, P.E. Belousov, V. V. Zhigarev, Determining the cation exchange capacity of montmorillonite by simultaneous thermal analysis method, *Russian Journal of Physical Chemistry A* 90 (2016) 1525–1529. <https://doi.org/10.1134/S0036024416080057>.
- [106] F. Elyasigorji, F. Farajiani, M. Hajipour Manjili, Q. Lin, S. Elyasigorji, V. Farhangi, H. Tabatabai, Comprehensive Review of Direct and Indirect Pozzolanic Reactivity Testing Methods, *Buildings* 13 (2023) 2789. <https://doi.org/10.3390/buildings13112789>.

- [107] F. Cassagnabère, M. Lachemi, M. Mouret, G. Escadeillas, Caractérisation performantielle d'un liant ternaire à base de ciment, laitier et métakaolin, *Canadian Journal of Civil Engineering* 38 (2011) 837–848. <https://doi.org/10.1139/111-043>.
- [108] S. Masuka, W. Gwenzi, T. Rukuni, Development, engineering properties and potential applications of unfired earth bricks reinforced by coal fly ash, lime and wood aggregates, *Journal of Building Engineering* 18 (2018) 312–320. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.03.010>.
- [109] J.A. Bogas, M. Silva, M. Glória Gomes, Unstabilized and stabilized compressed earth blocks with partial incorporation of recycled aggregates, *International Journal of Architectural Heritage* 13 (2019) 569–584. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1442891>.
- [110] S. Guettala, M. Bachar, Properties of the Compressed-Stabilized Earth Brick Containing Cork Granules, *J Earth Sci Clim Change* 7 (2016). <https://doi.org/10.4172/2157-7617.1000353>.
- [111] F. Zhu, Z. Li, W. Dong, Y. Ou, Geotechnical properties and microstructure of lime-stabilized silt clay, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 78 (2019) 2345–2354. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1307-5>.
- [112] J.S. Yadav, S.K. Tiwari, Effect of waste rubber fibres on the geotechnical properties of clay stabilized with cement, *Appl Clay Sci* 149 (2017) 97–110. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.07.037>.
- [113] R. Gobinath, G.P. Ganapathy, I.I. Akinwumi, S. Kovendiran, S. Hema, M. Thangaraj, Plasticity, strength, permeability and compressibility characteristics of

- black cotton soil stabilized with precipitated silica, *J Cent South Univ* 23 (2016) 2688–2694. <https://doi.org/10.1007/s11771-016-3330-7>.
- [114] R.A. Tchouateu Kamwa, S. Tome, J. Chongouang, I. Eguekeng, A. Spieß, M.N.A. Fetzer, K. Elie, C. Janiak, M.-A. Etoh, Stabilization of compressed earth blocks (CEB) by pozzolana based phosphate geopolymer binder: Physico-mechanical and microstructural investigations, *Cleaner Materials* 4 (2022) 100062. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100062>.
- [115] J.N.Y. Djobo, D. Stephan, A. Elimbi, Setting and hardening behavior of volcanic ash phosphate cement, *Journal of Building Engineering* 31 (2020) 101427. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101427>.
- [116] C.N. Bewa, H.K. Tchakouté, C.H. Rüscher, E. Kamseu, C. Leonelli, Influence of the curing temperature on the properties of poly(phospho-ferro-siloxo) networks from laterite, *SN Appl Sci* 1 (2019) 916. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0975-5>.
- [117] A. Arrigoni, R. Pelosato, G. Dotelli, C.T.S. Beckett, D. Ciancio, Weathering's beneficial effect on waste-stabilised rammed earth: a chemical and microstructural investigation, *Constr Build Mater* 140 (2017) 157–166. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.009>.
- [118] N. Toniolo, G. Taveri, K. Hurle, J.A. Roether, P. Ercole, I. Dlouhý, A.R. Boccaccini, Fly-ash-based geopolymers: How the addition of recycled glass or red mud waste influences the structural and mechanical properties, *Journal of Ceramic*

- Science and Technology 8 (2017) 411–419. <https://doi.org/10.4416/JCST2017-00053>.
- [119] Y. Huang, L. Gong, Y. Pan, C. Li, T. Zhou, X. Cheng, Facile construction of the aerogel/geopolymer composite with ultra-low thermal conductivity and high mechanical performance, RSC Adv 8 (2018) 2350–2356. <https://doi.org/10.1039/c7ra12041a>.
- [120] Katarzyna Stanienda-Pilecki, The importance of Fourier transform infrared spectroscopy in the identification of carbonate phases differentiated in magnesium content, Spectroscopy-US, [Spectroscopy (Santa Monica), SPECTROSCOPY-US], ISSN 0887-6703 34 (2019) 32–42.
- [121] A.A. Tireli, I. do R. Guimarães, J.C. de S. Terra, R.R. da Silva, M.C. Guerreiro, Fenton-like processes and adsorption using iron oxide-pillared clay with magnetic properties for organic compound mitigation, Environmental Science and Pollution Research 22 (2015) 870–881. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2973-x>.
- [122] S. Hajji, T. Turki, A. Boubakri, M. ben Amor, N. Mzoughi, Study of cadmium adsorption onto calcite using full factorial experiment design, Desalination Water Treat 83 (2017) 222–233. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.21079>.
- [123] S. Hussein Al Ali, S. Hussein Al Ali, Z. Zainal, M. Nazrul Hakim, M.Z. Hussein, Development of antiproliferative nanohybrid compound with controlled release property using ellagic acid as the active agent, Int J Nanomedicine (2011) 1373. <https://doi.org/10.2147/IJN.S21567>.

- [124] P. Murzyn, G. Malata, J. Wiśniewska, E. Kapeluszna, W. Nocuń-Wczelik, Characterization of 40-year-old calcium silicate pastes by thermal methods and other techniques, *J Therm Anal Calorim* 138 (2019) 4271–4278. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08519-8>.
- [125] J. Skocek, M. Zajac, M. ben Haha, Carbon Capture and Utilization by mineralization of cement pastes derived from recycled concrete, *Sci Rep* 10 (2020) 5614. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62503-z>.
- [126] S. Adu-Amankwah, M. Zajac, C. Stabler, B. Lothenbach, L. Black, Influence of limestone on the hydration of ternary slag cements, *Cem Concr Res* 100 (2017) 96–109. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.05.013>.
- [127] D.F. Katowah, M.A. Hussein, M.M. Alam, T.R. Sobahi, M.A. Gabal, A.M. Asiri, M.M. Rahman, Poly(pyrrole- *co-o* -toluidine) wrapped $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{R}(\text{GO}-\text{OXSWCNTs})$ ternary composite material for Ga^{3+} sensing ability, *RSC Adv* 9 (2019) 33052–33070. <https://doi.org/10.1039/C9RA03593A>.
- [128] I. ŠTUBA, A. TRNÍK, R. PODOBA, R. SOKOLÁČ, P. BACÍK, Elastic properties of waste calcite–clay ceramics during firing, *Journal of the Ceramic Society of Japan* 120 (2012) 351–354. <https://doi.org/10.2109/jcersj2.120.351>.
- [129] S. Janbuala, M. Eambua, A. Satayavibul, W. Nethan, Effect of bagasse and bagasse ash levels on properties of pottery products, *Heliyon* 4 (2018) e00814. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00814>.

- [130] J.C.T. Rezende, V.H.S. Ramos, H.A. Oliveira, R.M.P.B. Oliveira, E. Jesus, Removal of Cr(VI) from Aqueous Solutions Using Clay from Calumbi Geological Formation, N. Sra. Socorro, SE State, Brazil, *Materials Science Forum* 912 (2018) 1–6. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.912.1>.
- [131] H. Liu, P. Yuan, D. Liu, D. Tan, H. He, J. Zhu, Effects of solid acidity of clay minerals on the thermal decomposition of 12-aminolauric acid, *J Therm Anal Calorim* 114 (2013) 125–130. <https://doi.org/10.1007/s10973-012-2887-0>.
- [132] J. Rivera, J. Coelho, R. Silva, T. Miranda, F. Castro, N. Cristelo, Compressed earth blocks stabilized with glass waste and fly ash activated with a recycled alkaline cleaning solution, *J Clean Prod* 284 (2021) 124783. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124783>.
- [133] Y. Wang, H. Lu, J. Wang, H. He, Effects of Highly Crystallized Nano C-S-H Particles on Performances of Portland Cement Paste and Its Mechanism, *Crystals (Basel)* 10 (2020) 816. <https://doi.org/10.3390/cryst10090816>.
- [134] F. Wang, X. Kong, L. Jiang, D. Wang, The acceleration mechanism of nano-C-S-H particles on OPC hydration, *Constr Build Mater* 249 (2020) 118734. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118734>.
- [135] P. Kasinikota, D.D. Tripura, Evaluation of compressed stabilized earth block properties using crushed brick waste, *Constr Build Mater* 280 (2021) 122520. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122520>.
- [136] P. Sukmak, P. De Silva, S. Horpibulsuk, P. Chindapasirt, Sulfate Resistance of Clay-Portland Cement and Clay High-Calcium Fly Ash Geopolymer, *Journal of*

Materials in Civil Engineering 27 (2015).

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001112](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001112).

- [137] K. Liu, Y. Wang, N.-J. Jiang, A. Wang, D. Sun, X. Chen, Effect of aluminate content in cement on the long-term sulfate resistance of cement stabilized sand, *Marine Georesources & Geotechnology* 38 (2020) 844–853. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2019.1635235>.
- [138] I. Garcia-Lodeiro, A. Palomo, A. Fernández-Jiménez, D.E. Macphee, Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$, *Cem Concr Res* 41 (2011) 923–931. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.05.006>.
- [139] J.S.J. van Deventer, R. San Nicolas, I. Ismail, S.A. Bernal, D.G. Brice, J.L. Provis, Microstructure and durability of alkali-activated materials as key parameters for standardization, *J Sustain Cem Based Mater* 4 (2015) 116–128. <https://doi.org/10.1080/21650373.2014.979265>.
- [140] N.K. Lee, H.K. Lee, Reactivity and reaction products of alkali-activated, fly ash/slag paste, *Constr Build Mater* 81 (2015) 303–312. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.022>.
- [141] I. Ismail, S.A. Bernal, J.L. Provis, R. San Nicolas, S. Hamdan, J.S.J. van Deventer, Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash, *Cem Concr Compos* 45 (2014) 125–135. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.006>.

- [142] Howard T. Odum, *Environment, Power, and Society* 1st Edición, 1st ed., John Wiley & Sons Inc, 1971.
- [143] L.M. Reynosa-Morales, F.J. Olguín-Coca, H.A. Guillén-Trujillo, F.A. Alonso-Farrera, P. Castro-Borges, A. López-González, G. Ramos-Torres, Sustainability evaluation of different techniques for concrete mixing based on quality control, *Revista ALCONPAT* 7 (2017) 87–103. <https://doi.org/10.21041/ra.v7i1.175>.
- [144] M.T. Brown, S. Ulgiati, *Emergy Analysis and Environmental Accounting*, in: *Encyclopedia of Energy*, Elsevier, 2004: pp. 329–354. <https://doi.org/10.1016/B0-12-176480-X/00242-4>.

ANEXOS

A) Porcentajes de granulometrías de los bancos de suelo

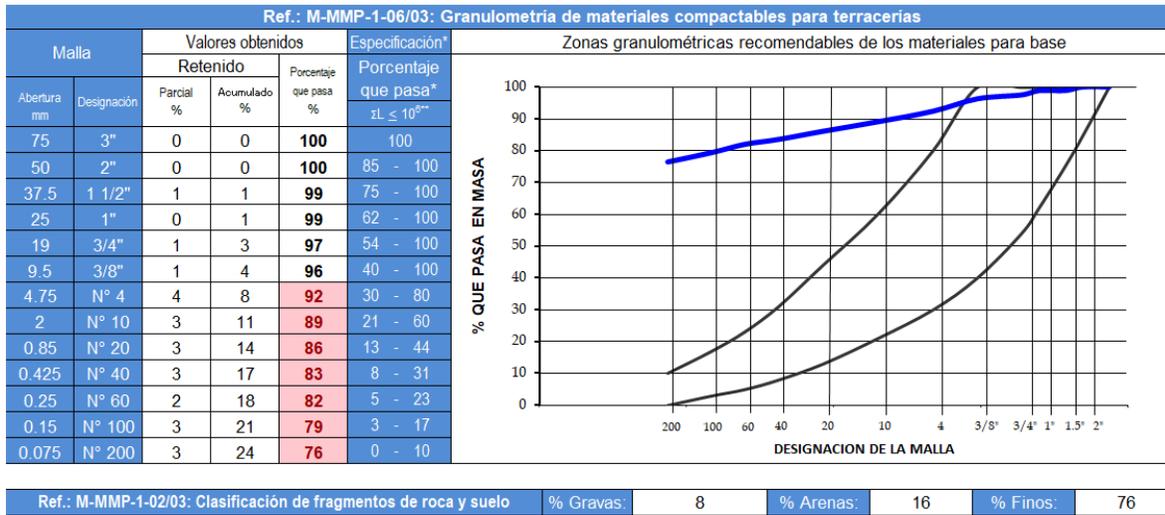


Figura 62 Porcentajes de granulometría B1 Zayre

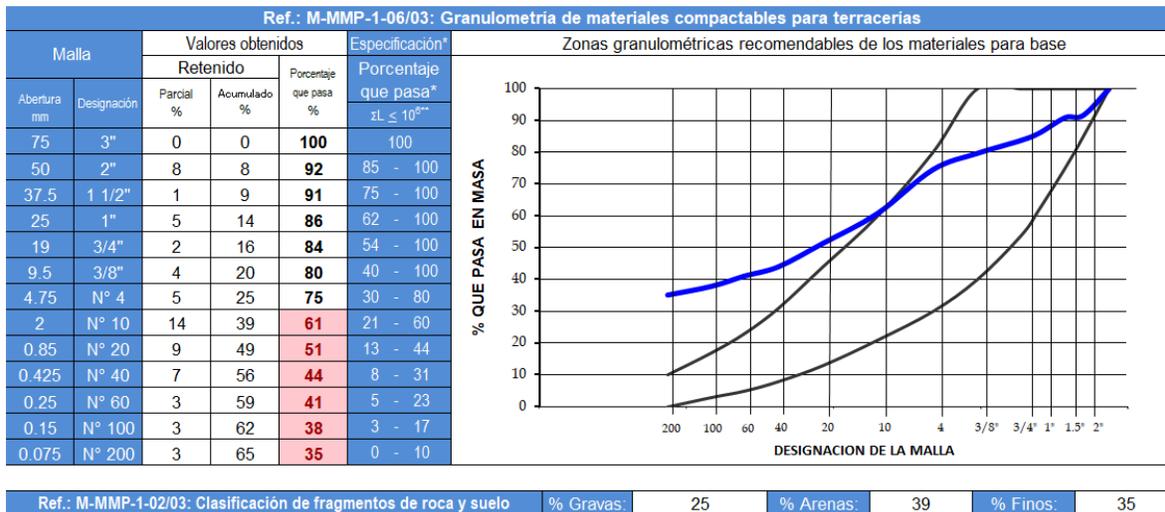
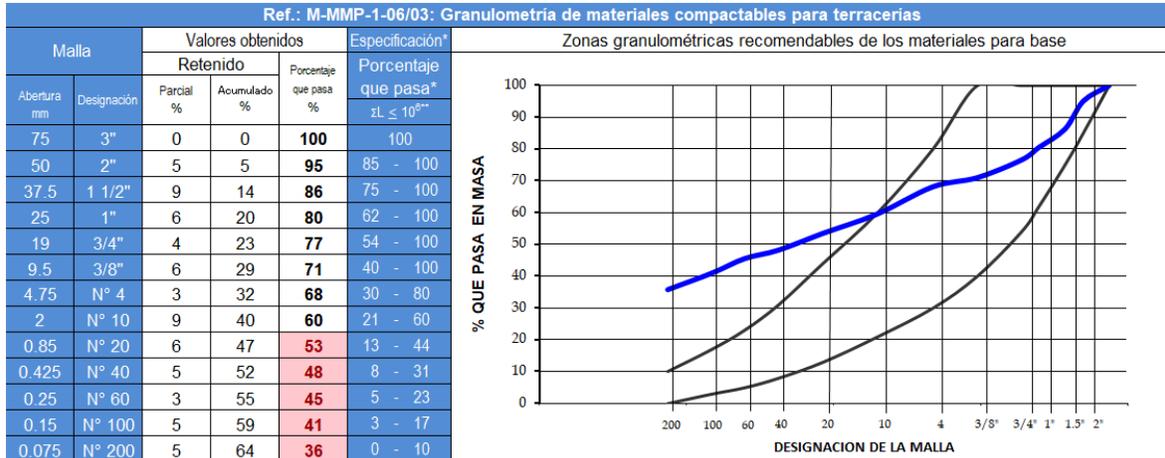
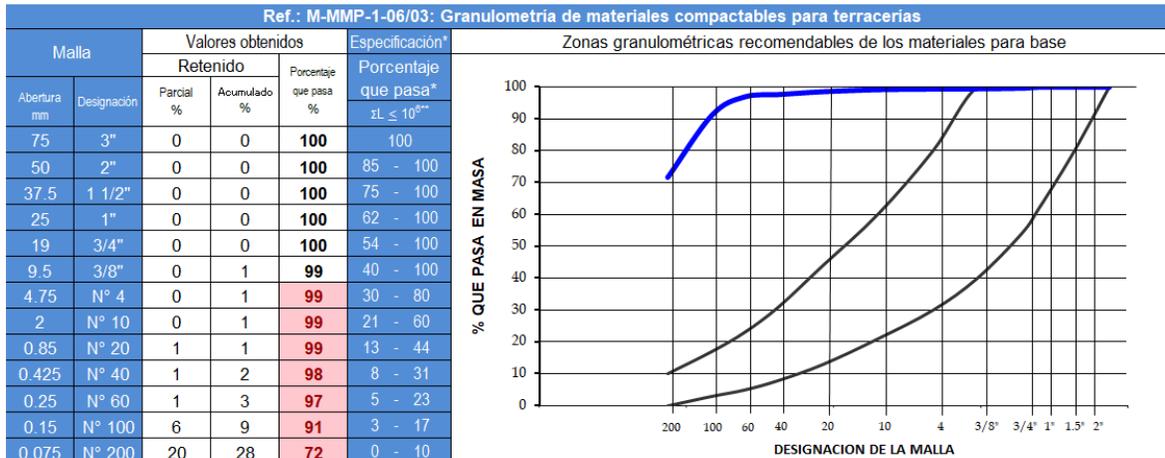


Figura 63 Porcentajes de granulometría B2 Cumbres



| | | | | | | |
|--|-----------|----|-----------|----|----------|----|
| Ref.: M-MMP-1-02/03: Clasificación de fragmentos de roca y suelo | % Gravas: | 32 | % Arenas: | 32 | % Finos: | 36 |
|--|-----------|----|-----------|----|----------|----|

Figura 64 Porcentajes de granulometría B3 Maclub



| | | | | | | |
|--|-----------|---|-----------|----|----------|----|
| Ref.: M-MMP-1-02/03: Clasificación de fragmentos de roca y suelo | % Gravas: | 1 | % Arenas: | 28 | % Finos: | 72 |
|--|-----------|---|-----------|----|----------|----|

Figura 65 Porcentajes de granulometría B4 Moya

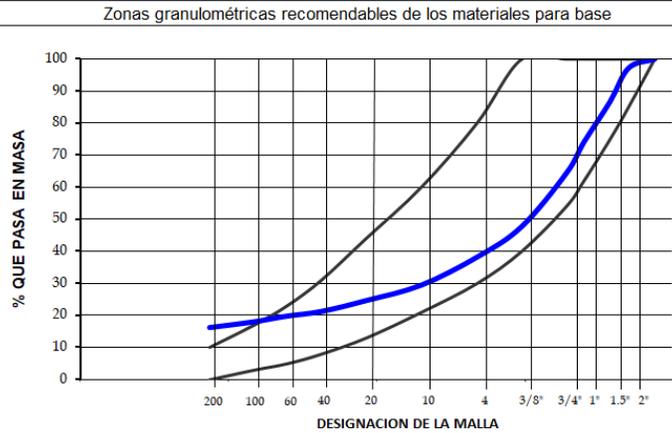
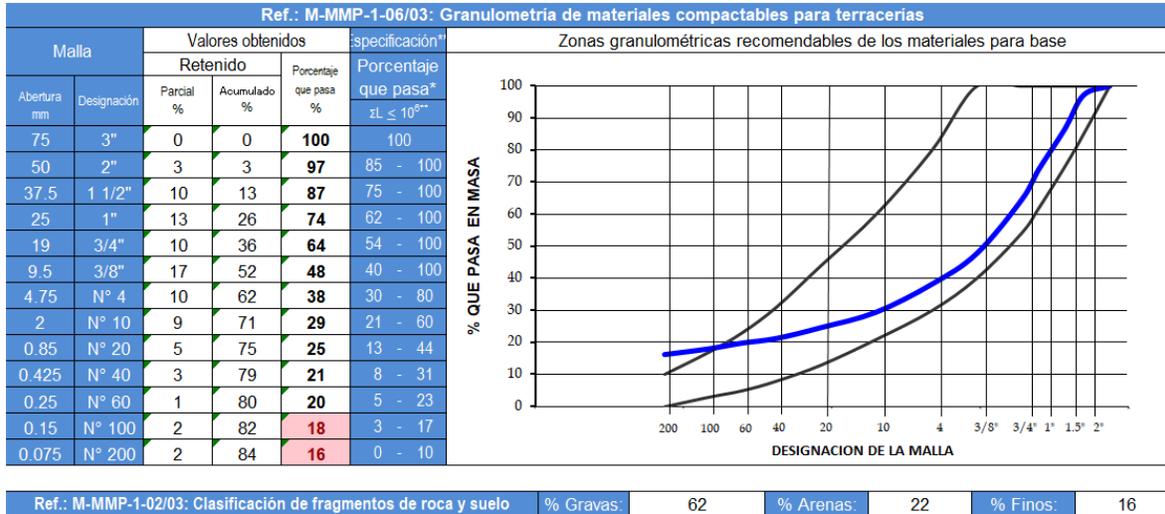


Figura 66 Porcentajes de granulometría B5 Cerritos

B) Interpretación del ensayo de granulometría

Del ensayo de granulometría realizado a las diferentes muestras de los 5 bancos de suelo, se pudo conocer no solo la cantidad y el tamaño de partículas que conforman los distintos bancos sino también la forma y textura de estas, de manera que el banco con mayor contenido de partículas gruesas (gravas) es B5 Cerritos con 62% los cuales se presentan con fragmentos de aristas muy pronunciadas con cortes muy marcados, todo lo contrario al banco B4 Moya con partículas gruesas boleadas o redondas de apenas 1% en su contenido, siendo evidentemente el de menor porcentaje y el segundo con mayor contenido de finos con 72%, superado por el banco B1 Zayre con 76% de estas partículas más pequeñas, y siendo el de menor concentración de arenas con 16%, siendo el banco B2 Cumbres el de mayor concentración de esta fracción de suelo con 39% seguido del banco B3 Maqlub con 32% el cuál se muestra con el mismo porcentaje en gravas presentando una granulometría muy uniforme de partículas boleadas dominando de manera leve su concentración de finos con 36%.

C) Límites Atterberg de los Suelos

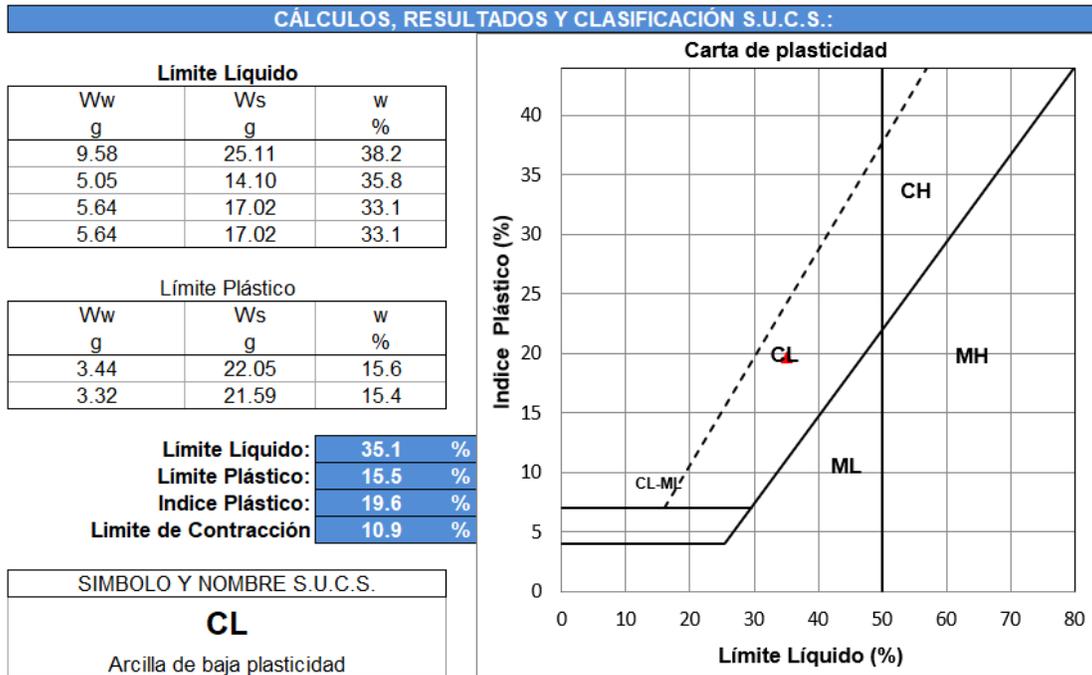


Figura 67 Resultados de LL, LP y LC B1 Zayre

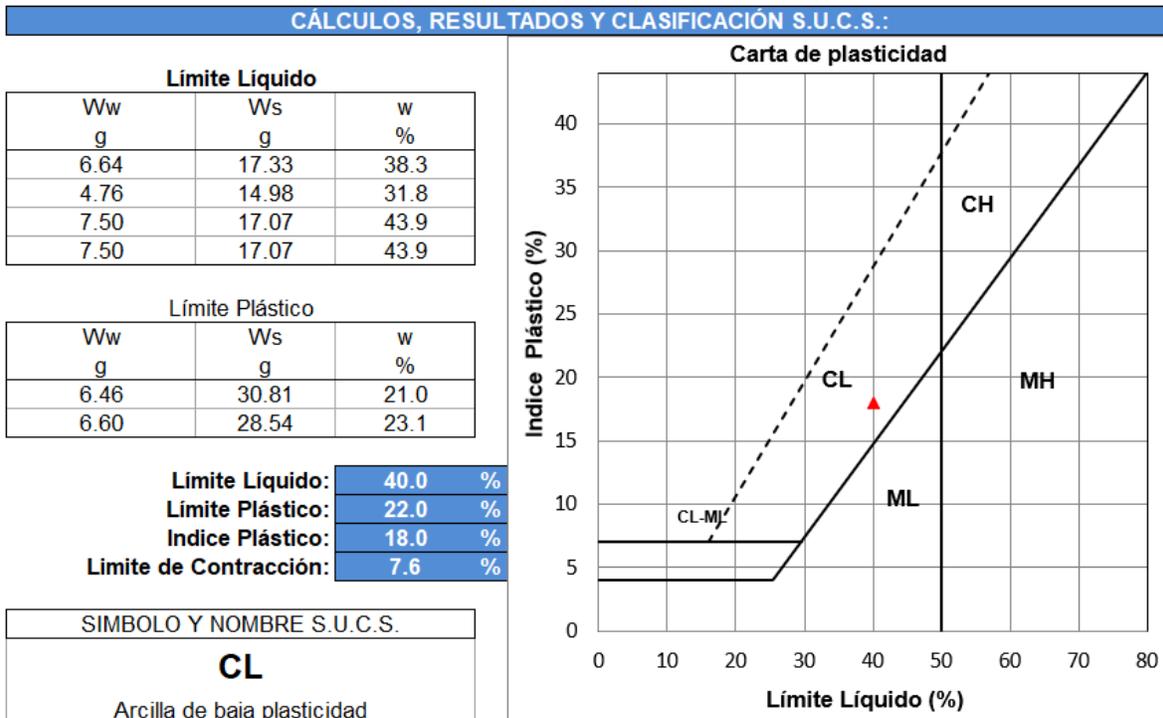


Figura 68 Resultados de LL, LP y LC B2 Cumbres

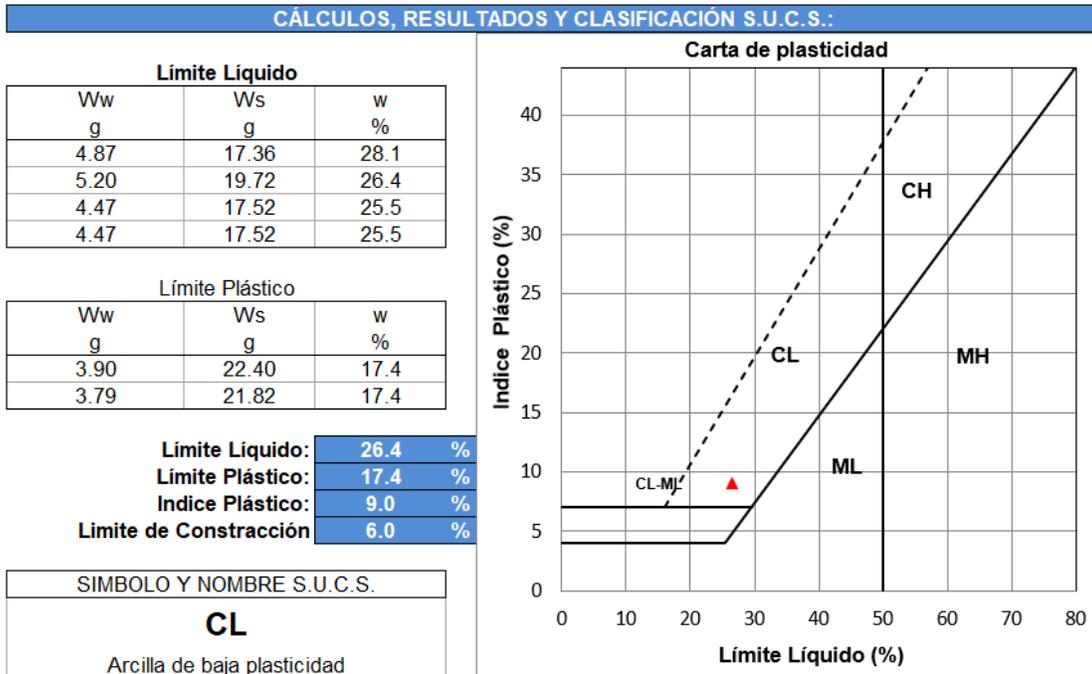


Figura 69 Resultados de LL, LP y LC B3 Maclub

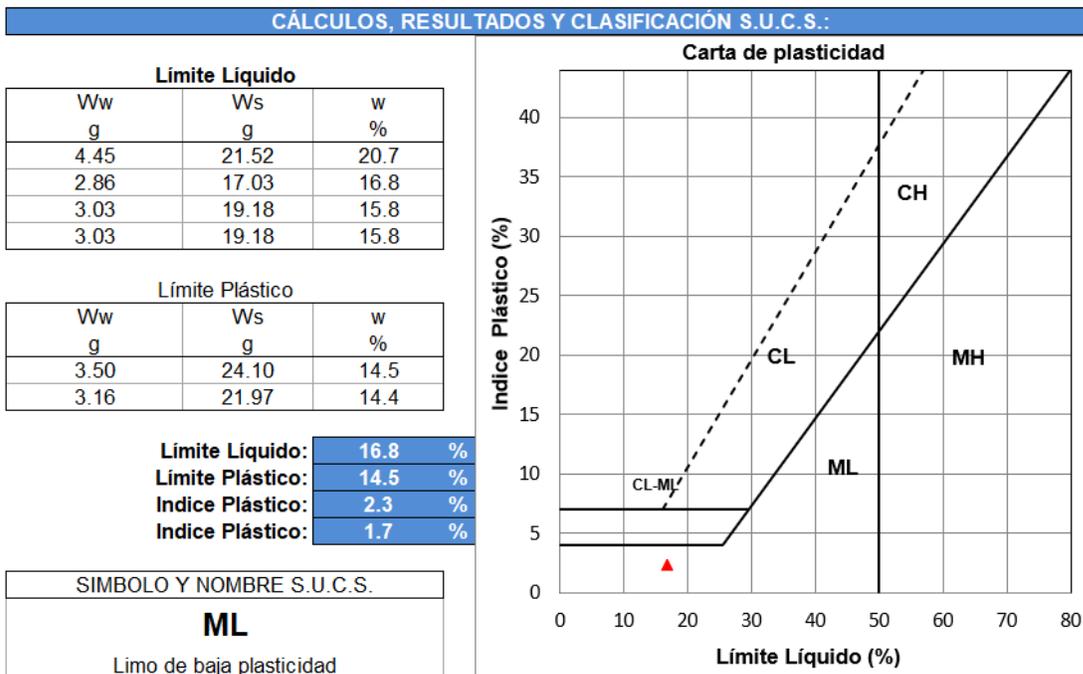


Figura 70 Resultados LL, LP y LC B4 Moya

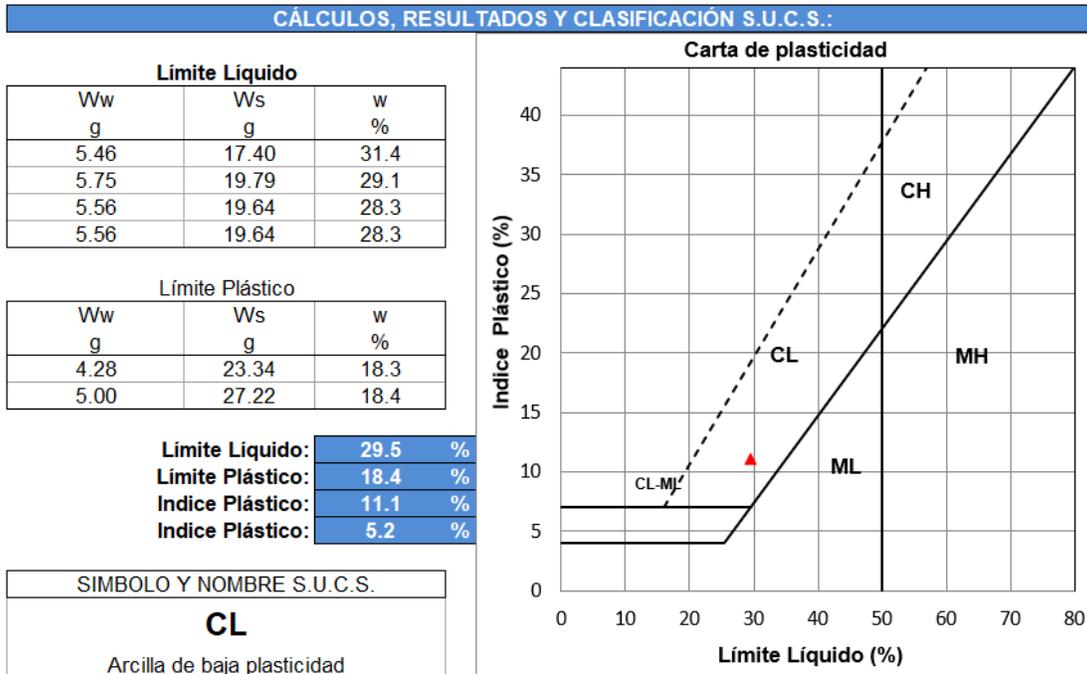


Figura 71 Resultados LL, LP y LC B5 Cerritos

D) Interpretación de consistencia de los suelos

De los ensayos de límites que se les realizaron a las muestras de los 5 bancos de suelos fue un acercamiento clave para comprender la consistencia de los suelos y una pronta identificación como arcilla o limo, y conocer una importante propiedad como es la plasticidad y así entender la trabajabilidad y moldeado de los suelos, y evitar su contracción y agrietamiento, donde el banco B1 Zayre presentó el porcentaje más alto de contracción con 10.9% por lo que redujo considerablemente sus dimensiones en la barra prismática y con un índice plástico de 19.6% que se considera y aproxima al comportamiento y a la identificación de una arcilla de baja plasticidad, con el mismo caso para B2 Cumbres, B3 Maqlub y B5 Cerritos siendo estos los dos últimos las arcillas con menor reducción con 5.2% y 6.0% respectivamente, y B4 Moya con un límite líquido de 16.8% y un índice plástico de 2.3%

tuvo una consistencia como limo de baja plasticidad y el de menor contracción de todas las muestras con 1.7%.

E) Ensayos de compactación dinámica de los Suelos

Tabla 15 Compactación Dinámica B1 Zayre

| Compactación Dinámica | | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------|--|------|------|-------|-------|
| 1 | Masa del molde más suelo húmedo (g) | 9421 | 9858 | 10047 | 10630 |
| 2 | Masa del molde (g) | 5776 | 5776 | 5776 | 5776 |
| 3 | Masa del suelo húmedo (g) | 3645 | 4082 | 4271 | 4854 |
| 4 | Volumen del molde (cm ³) | 2128 | 2128 | 2128 | 2128 |
| 5 | Masa volumétrica humedad (kg/cm ³) | 1713 | 1918 | 2007 | 2281 |
| 6 | Masa volumétrica seca (kg/cm ³) | 1610 | 1750 | 1739 | 1928 |

Tabla 16 Determinación de contenido de agua B1 Zayre

| Determinación del contenido de agua | | | | | | |
|-------------------------------------|--|----------------|-------|-------|-------|-------|
| 7 | Masa de la muestra húmeda más recipiente con tapa (g) | 857.5 | 707.5 | 768.4 | 637.3 | |
| 8 | Masa de la muestra seca más recipiente con tapa masa constante | Lect 1 (g) | 813.3 | 655.9 | 686.8 | 558.8 |
| | | Lect 2 (g) | 813.3 | 655.9 | 686.8 | 558.8 |
| | | Diferencia (g) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | Masa del agua (g) | 44.2 | 51.6 | 81.6 | 78.5 | |
| 10 | Masa del recipiente con tapa (g) | 122.8 | 118.4 | 157.2 | 129.8 | |
| 11 | Masa de solidos (g) | 690.5 | 537.5 | 529.6 | 429 | |
| 12 | Contenido de Agua (%) | 6.4 | 9.6 | 15.4 | 18.3 | |

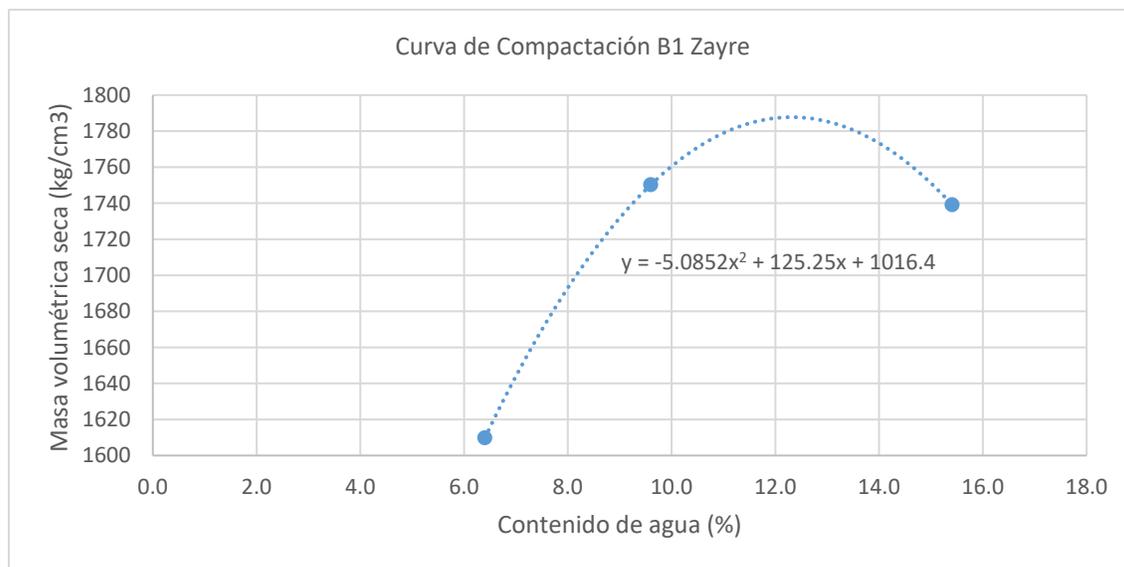


Figura 72 Curva de compactación B1 Zayre

Tabla 17 Compactación Dinámica B2 Cumbres

| Compactación Dinámica | | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------|--|------|------|------|------|
| 1 | Masa del molde más suelo húmedo (g) | 9185 | 9430 | 9766 | 9847 |
| 2 | Masa del molde (g) | 5776 | 5776 | 5776 | 5776 |
| 3 | Masa del suelo húmedo (g) | 3409 | 3654 | 3990 | 4071 |
| 4 | Volumen del molde (cm ³) | 2128 | 2128 | 2128 | 2128 |
| 5 | Masa volumétrica humedad (kg/cm ³) | 1602 | 1717 | 1875 | 1913 |
| 6 | Masa volumétrica seca (kg/cm ³) | 1483 | 1530 | 1542 | 1524 |

Tabla 18 Determinación del contenido de agua B2 Cumbres

| Determinación del contenido de agua | | | | | | |
|-------------------------------------|--|----------------|-------|-------|-------|-----|
| 7 | Masa de la muestra húmeda más recipiente con tapa (g) | 618 | 638.7 | 785.1 | 748.1 | |
| 8 | Masa de la muestra seca más recipiente con tapa masa constante | Lect 1 (g) | 581 | 583.4 | 666.8 | 621 |
| | | Lect 2 (g) | 581 | 583.4 | 666.8 | 621 |
| | | Diferencia (g) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | Masa del agua (g) | 37 | 55.3 | 118.3 | 127.1 | |
| 10 | Masa del recipiente con tapa (g) | 118.6 | 129.9 | 118.9 | 122.4 | |
| 11 | Masa de sólidos (g) | 462.4 | 453.5 | 547.9 | 498.6 | |
| 12 | Contenido de Agua (%) | 8.0 | 12.2 | 21.6 | 25.5 | |

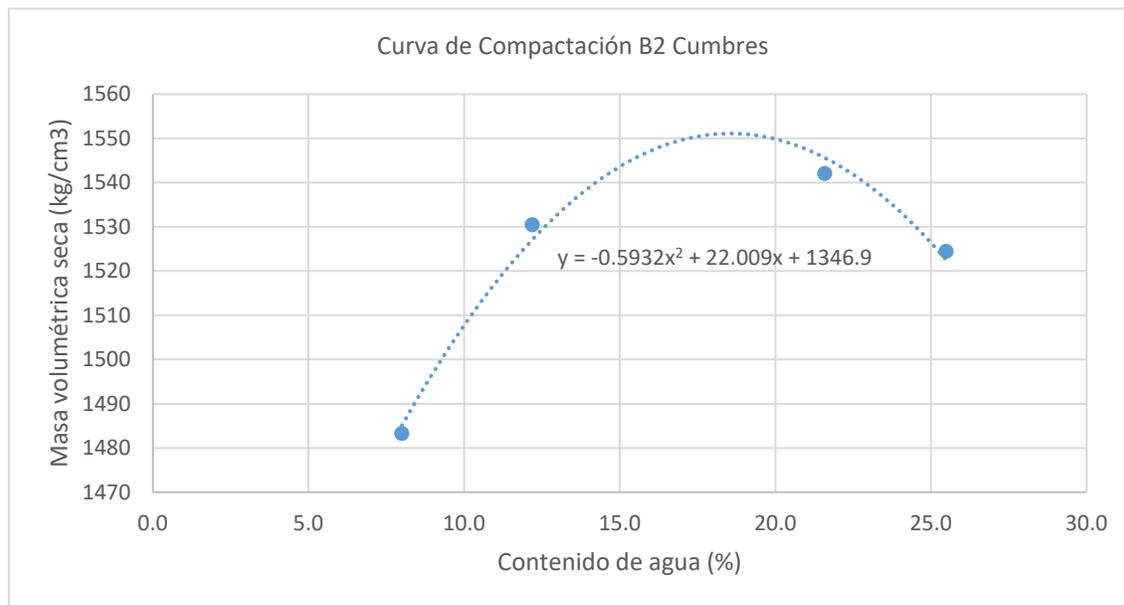


Figura 73 Curva de compactación B2 Cumbres

Tabla 19 Compactación Dinámica B3 Maclub

| Compactación Dinámica | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------------|--|------|------|------|-------|-------|
| 1 | Masa del molde más suelo húmedo (g) | 9485 | 9734 | 9894 | 10002 | 10000 |
| 2 | Masa del molde (g) | 5776 | 5776 | 5776 | 5776 | 5776 |
| 3 | Masa del suelo húmedo (g) | 3709 | 3958 | 4118 | 4226 | 4224 |
| 4 | Volumen del molde (cm ³) | 2128 | 2128 | 2128 | 2128 | 2128 |
| 5 | Masa volumétrica humedad (kg/cm ³) | 1743 | 1860 | 1935 | 1986 | 1985 |
| 6 | Masa volumétrica seca (kg/cm ³) | 1652 | 1714 | 1740 | 1730 | 1682 |

Tabla 20 Determinación del contenido de agua B3 Maclub

| Determinación del contenido de agua | | | | | | | |
|-------------------------------------|--|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 7 | Masa de la muestra húmeda más recipiente con tapa (g) | 654.3 | 774.1 | 800.9 | 852.3 | 702.8 | |
| 8 | Masa de la muestra seca más recipiente con tapa masa constante | Lect 1 (g) | 627 | 722.9 | 732.2 | 757.6 | 619.6 |
| | | Lect 2 (g) | 627 | 722.9 | 732.2 | 757.6 | 619.6 |
| | | Diferencia (g) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | Masa del agua (g) | 27.3 | 51.2 | 68.7 | 94.7 | 83.2 | |
| 10 | Masa del recipiente con tapa (g) | 129.9 | 122.4 | 118.9 | 117.9 | 157.2 | |
| 11 | Masa de sólidos (g) | 497.1 | 600.5 | 613.3 | 639.7 | 462.4 | |
| 12 | Contenido de Agua (%) | 5.5 | 8.5 | 11.2 | 14.8 | 18.0 | |

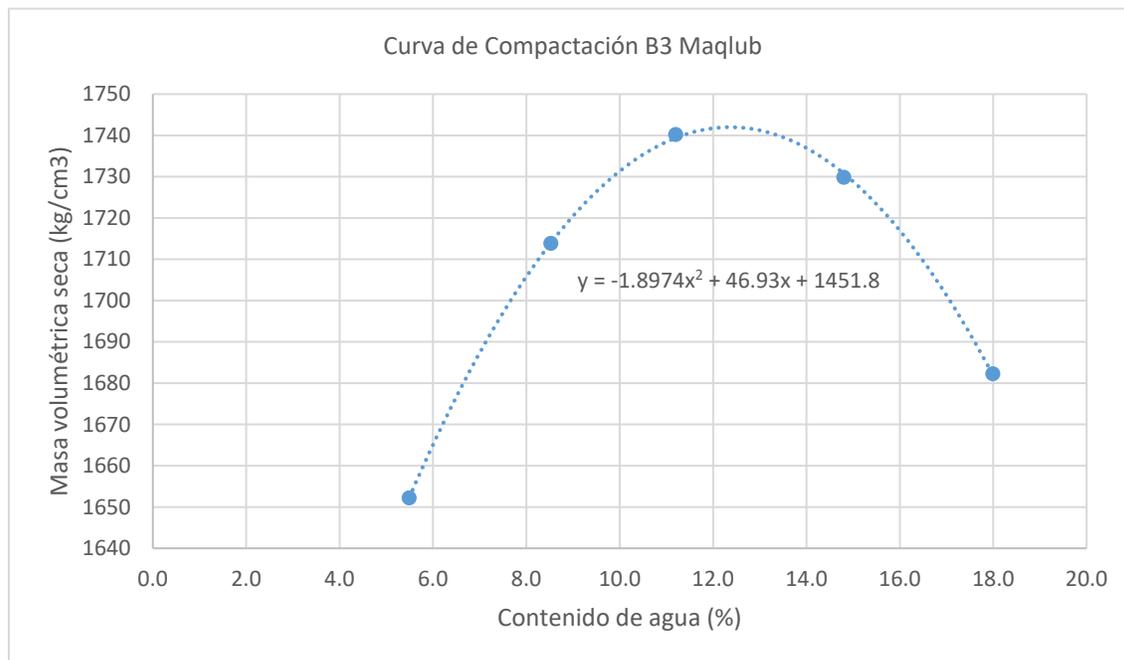


Figura 74 Curva de compactación B3 Maclub

Tabla 21 Compactación Dinámica B4 Moya

| Compactación Dinámica | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Masa del molde más suelo húmedo (g) | 5291.8 | 5423.1 | 5536.6 | 5592.3 | 5594.1 |
| 2 | Masa del molde (g) | 3647.9 | 3647.9 | 3647.9 | 3647.9 | 3647.9 |
| 3 | Masa del suelo húmedo (g) | 1643.9 | 1775.2 | 1888.7 | 1944.4 | 1946.2 |
| 4 | Volumen del molde (cm ³) | 942 | 942 | 942 | 942 | 942 |
| 5 | Masa volumétrica humedad (kg/cm ³) | 1745 | 1885 | 2005 | 2064 | 2066 |
| 6 | Masa volumétrica seca (kg/cm ³) | 1682 | 1757 | 1800 | 1785 | 1710 |

Tabla 22 Compactación Dinámica B4 Moya

| Determinación del contenido de agua | | | | | | | |
|-------------------------------------|--|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 7 | Masa de la muestra húmeda más recipiente con tapa (g) | 324.6 | 343.3 | 364.9 | 387.6 | 407.7 | |
| 8 | Masa de la muestra seca más recipiente con tapa masa constante | Lect 1 (g) | 317.5 | 328.9 | 339.8 | 351.2 | 358.6 |
| | | Lect 2 (g) | 317.5 | 328.9 | 339.8 | 351.2 | 358.6 |
| | | Diferencia (g) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | Masa del agua (g) | 7.1 | 14.4 | 25.1 | 36.4 | 49.1 | |
| 10 | Masa del recipiente con tapa (g) | 129.8 | 129.8 | 118.9 | 118 | 122.4 | |
| 11 | Masa de solidos (g) | 187.7 | 199.1 | 220.9 | 233.2 | 236.2 | |
| 12 | Contenido de Agua (%) | 3.8 | 7.2 | 11.4 | 15.6 | 20.8 | |

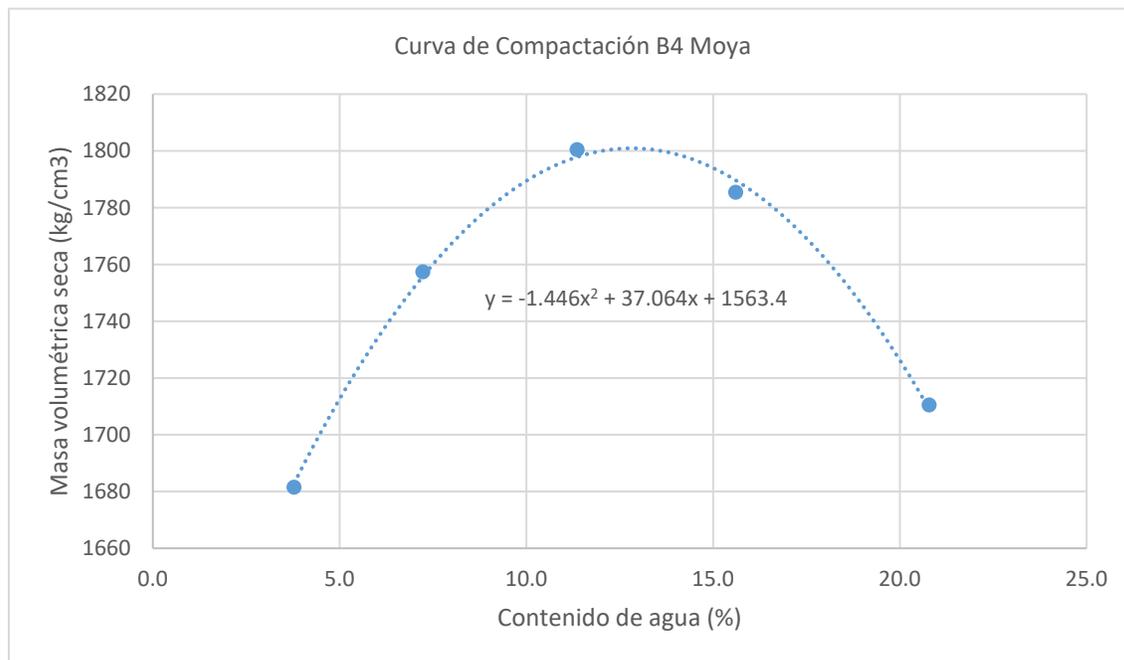


Figura 75 Curva de compactación B4 Moya

Tabla 23 Compactación Dinámica B5 Cerritos

| Compactación Dinámica | | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------|--|------|-------|-------|-------|
| 1 | Masa del molde más suelo húmedo (g) | 9947 | 10283 | 10526 | 10453 |
| 2 | Masa del molde (g) | 5776 | 5776 | 5776 | 5776 |
| 3 | Masa del suelo húmedo (g) | 4171 | 4507 | 4750 | 4677 |
| 4 | Volumen del molde (cm ³) | 2128 | 2128 | 2128 | 2128 |
| 5 | Masa volumétrica humedad (kg/cm ³) | 1960 | 2118 | 2232 | 2198 |
| 6 | Masa volumétrica seca (kg/cm ³) | 1885 | 1983 | 1976 | 1895 |

Tabla 24 Determinación del contenido de agua B5 Cerritos

| Determinación del contenido de agua | | | | | | |
|-------------------------------------|--|----------------|-------|-------|-------|-------|
| 7 | Masa de la muestra húmeda más recipiente con tapa (g) | 663.6 | 749.5 | 867 | 766.9 | |
| 8 | Masa de la muestra seca más recipiente con tapa masa constante | Lect 1 (g) | 643.1 | 709.3 | 781 | 677.5 |
| | | Lect 2 (g) | 643.1 | 709.3 | 781 | 677.5 |
| | | Diferencia (g) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | Masa del agua (g) | 20.5 | 40.2 | 86 | 89.4 | |
| 10 | Masa del recipiente con tapa (g) | 129.8 | 118 | 118.9 | 118.6 | |
| 11 | Masa de sólidos (g) | 513.3 | 591.3 | 662.1 | 558.9 | |
| 12 | Contenido de Agua (%) | 4.0 | 6.8 | 13.0 | 16.0 | |

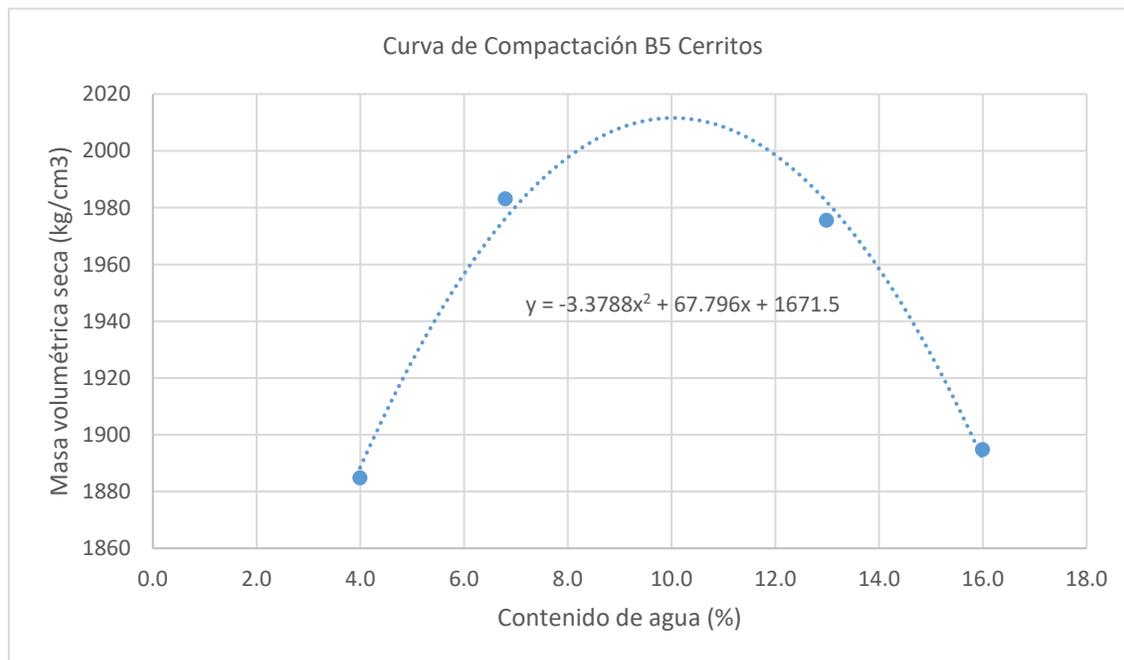


Figura 76 Curva de compactación B5 Cerritos

F) Interpretación Proctor de los bancos de suelos

Del Ensayo de Compactación Dinámica Estándar y Modificada se obtuvo la densidad mayor que pueden alcanzar las muestras de los 5 bancos de suelos para su correcta compactación a su correcta condición de humedad, siendo la masa volumétrica seca máxima y humedad óptima de 1790kg/m^3 y 12.5% respectivamente para B1 Zayre, 1558kg/m^3 y 18.4% para B2 Cumbres, 1745kg/m^3 y 12.4% para B3 Maqlub, 1810kg/m^3 y 12.8% para B4 Moya y 2025kg/m^3 y 10.1% para B5 Cerritos siendo el que menos porcentaje de agua requiere para obtener una mayor densidad y mejor compactación y donde B2 Cumbres requiere mayor porcentaje de agua a menor densidad.

G) California Bearing Ratio (CBR) de los suelos

Tabla 25 CBR y Expansión B1 Zayre

| VALOR DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR) Y EXPANSIÓN (EXP) | | | | | |
|--|---|----------------------|-------|-------|-------|
| 1 | Contenido de agua óptima | % | | | |
| | No. de golpes por capa | | 10 | 25 | 56 |
| 2 | Masa del espécimen secado al horno | (g) | | | |
| 3 | Agua por agregar | (cm ³) | | | |
| 4 | Identificación del molde y disco espaciador | | | | |
| 5 | Altura del espécimen de prueba | (mm) | 0.996 | 0.984 | 0.971 |
| 6 | Masa del molde + suelo compactado | (g) | 10986 | 11164 | 11380 |
| 7 | Masa del molde | (g) | 7165 | 7180 | 7120 |
| 8 | Masa del espécimen | (g) | 3821 | 3984 | 4260 |
| 9 | Volumen efectivo del molde (espécimen) | (cm ³) | 2116 | 2106 | 2115 |
| 10 | Masa volumétrica húmeda | (kg/m ³) | 1806 | 1892 | 2014 |
| 11 | Masa del molde + suelo saturado | (g) | 11236 | 11420 | 11545 |
| Determinación del Contenido de Agua (Humedad) | | | | | |
| 12 | Identificación del recipiente | | | | |
| 13 | Masa del recipiente + material húmedo | (g) | 577.7 | 776.1 | 499.4 |
| 14 | Masa del recipiente + material seco | (g) | 528.6 | 705.3 | 456.9 |
| 15 | Masa del recipiente | (g) | 126.4 | 129.4 | 108.7 |
| 16 | Masa del agua | (g) | 49.1 | 70.8 | 42.5 |
| 17 | Masa del material seco | (g) | 402.2 | 575.9 | 348.2 |
| 18 | Contenido de agua (humedad) | (%) | 12.2 | 12.3 | 12.2 |

| | | | | | |
|------------------|---------------------------------|----------------------|------|------|------|
| 19 | Masa volumétrica seca | (kg/m ³) | 1609 | 1685 | 1795 |
| Expansión | | | | | |
| 20 | Lectura inicial de expansión | | 4 | 3 | 4 |
| 21 | Lectura final de expansión | | 4.11 | 3.34 | 4.75 |
| 22 | Expansión durante la saturación | (%) | 0.24 | 0.74 | 1.60 |
| 23 | Expansión Promedio | (%) | 0.86 | | |

Tabla 26 Registro de Cargas de Penetración B1 Zayre

| Penetración | | Cargas de Penetración | | |
|-------------|--------|-----------------------|-----------|-----------|
| (Pulg.) | Tiempo | Molde No. | | |
| | | 10 golpes | 25 golpes | 56 golpes |
| 0.025 | (0:30) | 31 | 34 | 65 |
| 0.050 | (0:30) | 52 | 61 | 129 |
| 0.075 | (0:30) | 67 | 84 | 172 |
| 0.100 | (0:30) | 77 | 104 | 202 |
| 0.125 | (0:30) | 87 | 120 | 223 |
| 0.150 | (0:30) | 94 | 132 | 238 |
| 0.175 | (0:30) | 101 | 142 | 249 |
| 0.200 | (0:30) | 107 | 150 | 260 |
| 0.300 | (0:30) | 124 | 173 | 298 |
| 0.400 | (0:30) | 138 | 194 | 331 |
| 0.500 | (0:30) | 152 | 215 | 368 |

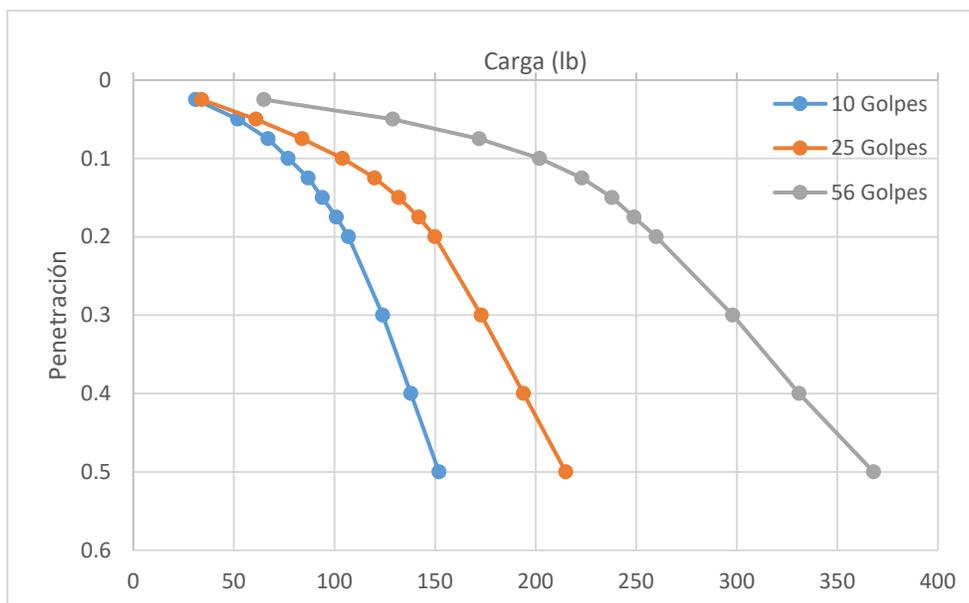


Figura 77 Cargas (Lb) de penetración B1 Zayre

Tabla 27 Correcciones de carga de presión B1 Zayre

| Molde No. | Presión a 0.1 Pulg | Presión a 0.1 Pulg | CBR a 0.1 Pulg | CBR a 0.2 Pulg |
|-----------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|
| Vc/34-23 | 25.67 | 35.67 | 2.57 | 2.38 |
| Vc/34-11 | 34.67 | 50.00 | 3.47 | 3.33 |
| Vc/34-27 | 67.33 | 86.67 | 6.73 | 5.78 |

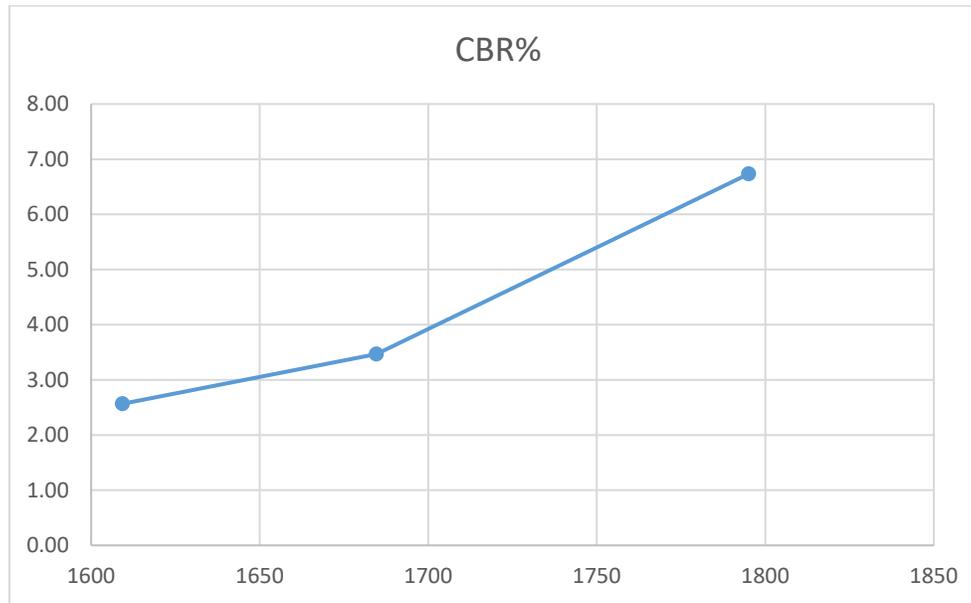


Figura 78 Porcentaje de CBR B1 Zayre

Tabla 28 CBR y Expansión B2 Cumbres

| VALOR DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR) Y EXPANSIÓN (EXP) | | | | |
|--|---|---------|-------|--------|
| 1 | Contenido de agua óptima | % | | |
| | No. de golpes por capa | | 10 | 25 |
| | | | | 56 |
| 2 | Masa del espécimen secado al horno | (g) | | |
| 3 | Agua por agregar | (cm3) | | |
| 4 | Identificación del molde y disco espaciador | | | |
| 5 | Altura del espécimen de prueba | (mm) | 0.982 | 0.985 |
| | | | | 0.9771 |
| 6 | Masa del molde + suelo compactado | (g) | 10576 | 10812 |
| | | | | 11113 |
| 7 | Masa del molde | (g) | 7116 | 7120 |
| | | | | 7155 |
| 8 | Masa del espécimen | (g) | 3460 | 3692 |
| | | | | 3958 |
| 9 | Volumen efectivo del molde (espécimen) | (cm3) | 2115 | 2129 |
| | | | | 2119 |
| 10 | Masa volumétrica humedad | (kg/m3) | 1636 | 1734 |
| | | | | 1868 |
| 11 | Masa del molde + suelo saturado | (g) | 10888 | 11052 |
| | | | | 11268 |
| Determinación del Contenido de Agua (Humedad) | | | | |
| 12 | Identificación del recipiente | | | |
| 13 | Masa del recipiente + material húmedo | (g) | 657.2 | 757.5 |
| | | | | 698.2 |
| 14 | Masa del recipiente + material seco | (g) | 575.3 | 665.5 |
| | | | | 610.7 |

| | | | | | |
|------------------|---------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|
| 15 | Masa del recipiente | (g) | 122.9 | 157.3 | 129.7 |
| 16 | Masa del agua | (g) | 81.9 | 92 | 87.5 |
| 17 | Masa del material seco | (g) | 452.4 | 508.2 | 481 |
| 18 | Contenido de agua (humedad) | (%) | 18.1 | 18.1 | 18.2 |
| 19 | Masa volumétrica seca | (kg/m ³) | 1385 | 1468 | 1580 |
| Expansión | | | | | |
| 20 | Lectura inicial de expansión | | 5.0 | 6.0 | 4.0 |
| 21 | Lectura final de expansión | | 5.1 | 6.1 | 4.1 |
| 22 | Expansión durante la saturación | (%) | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| 23 | Expansión Promedio | (%) | 0.02 | | |

Tabla 29 Registro de Cargas de Penetración B2 Cumbres

| Penetración | | Cargas de Penetración | | |
|-------------|--------|-----------------------|-----------|-----------|
| (Pulg) | Tiempo | Molde No. | | |
| | | 10 golpes | 25 golpes | 56 golpes |
| 0.025 | (0:30) | 27 | 97 | 195 |
| 0.050 | (0:30) | 47 | 214 | 612 |
| 0.075 | (0:30) | 60 | 306 | 992 |
| 0.100 | (0:30) | 70 | 381 | 1247 |
| 0.125 | (0:30) | 79 | 449 | 1434 |
| 0.150 | (0:30) | 87 | 510 | 1590 |
| 0.175 | (0:30) | 95 | 567 | 1721 |
| 0.200 | (0:30) | 103 | 615 | 1844 |
| 0.300 | (0:30) | 134 | 788 | 2232 |
| 0.400 | (0:30) | 164 | 932 | 2542 |
| 0.500 | (0:30) | 195 | 1073 | 2813 |

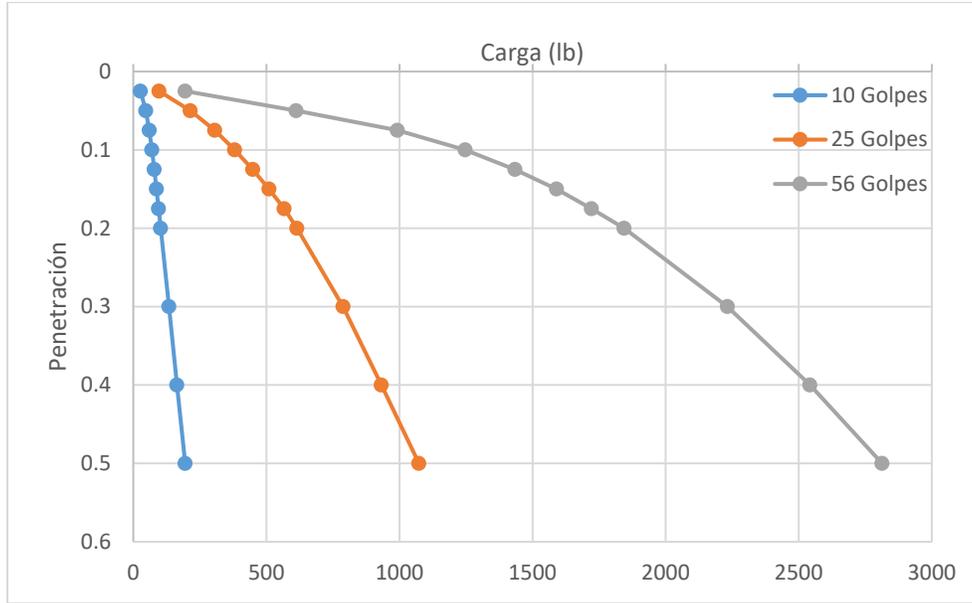


Figura 79 Cargas (Lb) de penetración B2 Cumbres

Tabla 30 Correcciones de carga de presión B2 Cumbres

| Molde No. | Presión a 0.1 Pulg | Presión a 0.1 Pulg | CBR a 0.1 Pulg | CBR a 0.2 Pulg |
|-----------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|
| Vc/34-23 | 23.33 | 34.33 | 2.33 | 2.29 |
| Vc/34-11 | 127.00 | 205.00 | 12.70 | 13.67 |
| Vc/34-27 | 415.67 | 614.67 | 41.57 | 40.98 |

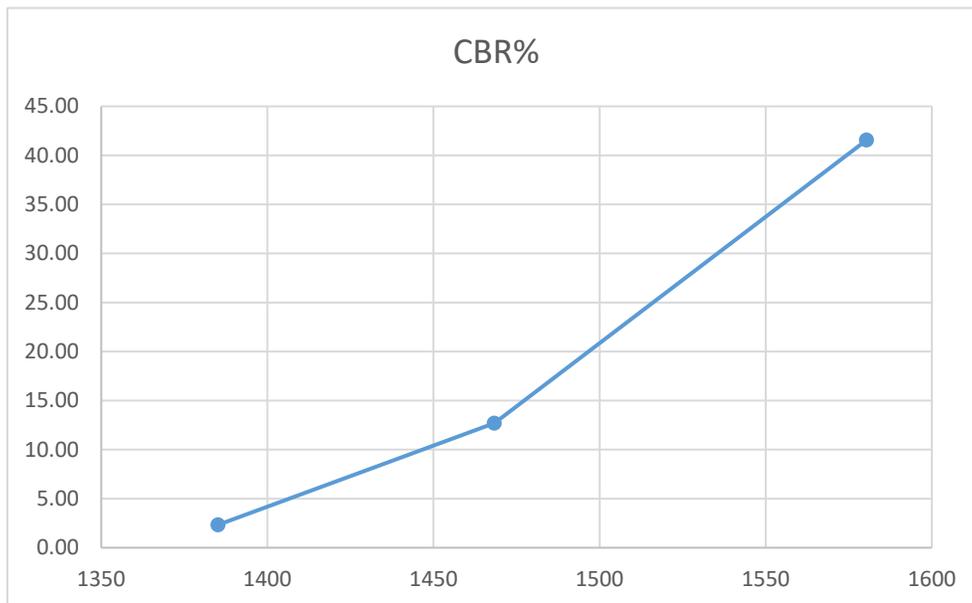


Figura 80 Porcentaje de CBR B2 Cumbres

Tabla 31 CBR y Expansión B3 Maqlub

| VALOR DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR) Y EXPANSIÓN (EXP) | | | | | |
|--|---|----------------------|--------|-------|--------|
| 1 | Contenido de agua óptima | % | | | |
| | No. de golpes por capa | | 10 | 25 | 56 |
| 2 | Masa del espécimen secado al horno | (g) | | | |
| 3 | Agua por agregar | (cm ³) | | | |
| 4 | Identificación del molde y disco espaciador | | | | |
| 5 | Altura del espécimen de prueba | (mm) | 0.9473 | 0.935 | 0.9641 |
| 6 | Masa del molde + suelo compactado | (g) | 10843 | 10982 | 11214 |
| 7 | Masa del molde | (g) | 7180 | 7120 | 7046 |
| 8 | Masa del espécimen | (g) | 3663 | 3862 | 4168 |
| 9 | Volumen efectivo del molde (espécimen) | (cm ³) | 2121 | 2115 | 2119 |
| 10 | Masa volumétrica húmeda | (kg/m ³) | 1727 | 1826 | 1967 |
| 11 | Masa del molde + suelo saturado | (g) | | | |
| Determinación del Contenido de Agua (Humedad) | | | | | |
| 12 | Identificación del recipiente | | | | |
| 13 | Masa del recipiente + material húmedo | (g) | 628.2 | 555 | 620.1 |
| 14 | Masa del recipiente + material seco | (g) | 570.3 | 507.3 | 564.8 |
| 15 | Masa del recipiente | (g) | 122 | 129.8 | 122.5 |
| 16 | Masa del agua | (g) | 57.9 | 47.7 | 55.3 |
| 17 | Masa del material seco | (g) | 448.3 | 377.5 | 442.3 |
| 18 | Contenido de agua (humedad) | (%) | 12.9 | 12.6 | 12.5 |
| 19 | Masa volumétrica seca | (kg/m ³) | 1529 | 1621 | 1748 |
| Expansión | | | | | |
| 20 | Lectura inicial de expansión | | 5.0 | 4.0 | 5.0 |
| 21 | Lectura final de expansión | | 5.3 | 4.3 | 5.2 |
| 22 | Expansión durante la saturación | (%) | 0.06 | 0.06 | 0.04 |
| 23 | Expansión Promedio | (%) | 0.05 | | |

Tabla 32 Registro de Cargas de Penetración B3 Maqlub

| Penetración | | Cargas de Penetración | | |
|-------------|--------|-----------------------|-----------|-----------|
| (Pulg) | Tiempo | Molde No. | | |
| | | 10 golpes | 25 golpes | 56 golpes |
| 0.025 | (0:30) | 83 | 111 | 185 |
| 0.050 | (0:30) | 133 | 211 | 427 |
| 0.075 | (0:30) | 163 | 282 | 607 |
| 0.100 | (0:30) | 180 | 343 | 729 |
| 0.125 | (0:30) | 190 | 396 | 830 |
| 0.150 | (0:30) | 197 | 441 | 917 |
| 0.175 | (0:30) | 201 | 482 | 988 |
| 0.200 | (0:30) | 204 | 519 | 1055 |
| 0.300 | (0:30) | 215 | 639 | 1264 |

| | | | | |
|--------------|--------|-----|-----|------|
| 0.400 | (0:30) | 224 | 734 | 1430 |
| 0.500 | (0:30) | 235 | 817 | 1597 |

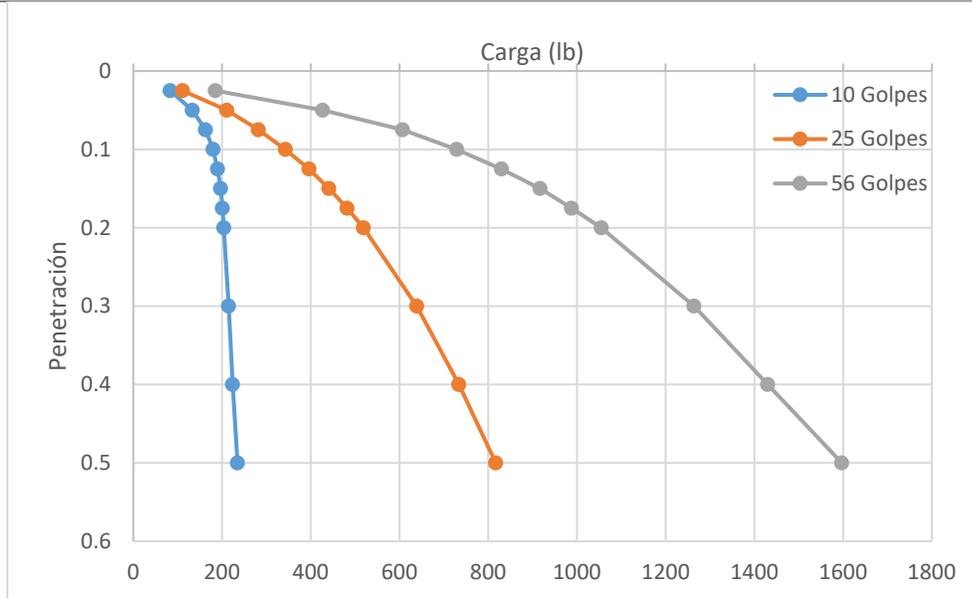


Figura 81 Cargas (Lb) de penetración B3 Maqlub

Tabla 33 Correcciones de carga de presión B3 Maqlub

| Molde No. | Presión a 0.1 Pulg | Presión a 0.1 Pulg | CBR a 0.1 Pulg | CBR a 0.2 Pulg |
|-----------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|
| Vc/34-23 | 60.00 | 68.00 | 6.00 | 4.53 |
| Vc/34-11 | 114.33 | 173.00 | 11.43 | 11.53 |
| Vc/34-27 | 243.00 | 351.67 | 24.30 | 23.44 |

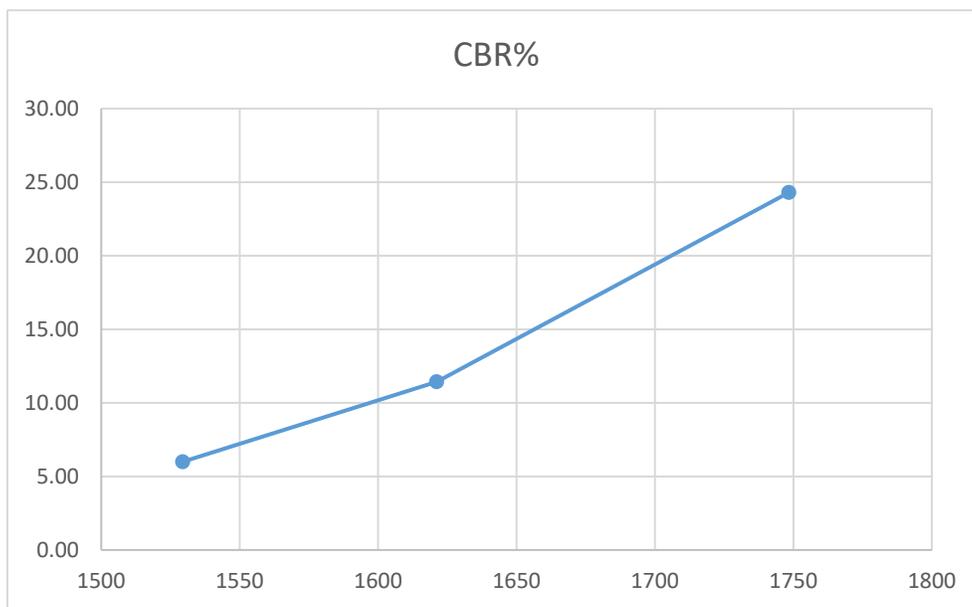


Figura 82 Porcentaje de CBR B3 Maqlub

Tabla 34 CBR y Expansión B4 Moya

| VALOR DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR) Y EXPANSIÓN (EXP) | | | | | |
|--|---|---------|-------|-------|--------|
| 1 | Contenido de agua óptima | % | | | |
| | No. de golpes por capa | | 10 | 25 | 56 |
| 2 | Masa del espécimen secado al horno | (g) | | | |
| 3 | Agua por agregar | (cm3) | | | |
| 4 | Identificación del molde y disco espaciador | | | | |
| 5 | Altura del espécimen de prueba | (mm) | 0.942 | 0.824 | 0.9311 |
| 6 | Masa del molde + suelo compactado | (g) | 10976 | 11346 | 11482 |
| 7 | Masa del molde | (g) | 7145 | 7155 | 7155 |
| 8 | Masa del espécimen | (g) | 3831 | 4191 | 4327 |
| 9 | Volumen efectivo del molde (espécimen) | (cm3) | 2113 | 2125 | 2117 |
| 10 | Masa volumétrica húmeda | (kg/m3) | 1813 | 1972 | 2044 |
| 11 | Masa del molde + suelo saturado | (g) | 11186 | 11458 | 11544 |
| Determinación del Contenido de Agua (Humedad) | | | | | |
| 12 | Identificación del recipiente | | | | |
| 13 | Masa del recipiente + material húmedo | (g) | 658.3 | 657.3 | 720.4 |
| 14 | Masa del recipiente + material seco | (g) | 597.8 | 594 | 653.1 |
| 15 | Masa del recipiente | (g) | 117.9 | 118.9 | 118.6 |
| 16 | Masa del agua | (g) | 60.5 | 63.3 | 67.3 |
| 17 | Masa del material seco | (g) | 479.9 | 475.1 | 534.5 |
| 18 | Contenido de agua (humedad) | (%) | 12.6 | 13.3 | 12.6 |
| 19 | Masa volumétrica seca | (kg/m3) | 1610 | 1740 | 1815 |
| Expansión | | | | | |
| 20 | Lectura inicial de expansión | | 3 | 3 | 5 |
| 21 | Lectura final de expansión | | 3.2 | 3.7 | 5.4 |
| 22 | Expansión durante la saturación | (%) | 0.04 | 0.15 | 0.08 |
| 23 | Expansión Promedio | (%) | 0.09 | | |

Tabla 35 Registro de Cargas de Penetración B4 Moya

| Penetración | | Cargas de Penetración | | |
|--------------|--------|-----------------------|-----------|-----------|
| (Pulg) | Tiempo | Molde No. | | |
| | | 10 golpes | 25 golpes | 56 golpes |
| 0.025 | (0:30) | 27 | 40 | 54 |
| 0.050 | (0:30) | 51 | 90 | 108 |
| 0.075 | (0:30) | 79 | 130 | 192 |
| 0.100 | (0:30) | 109 | 152 | 270 |
| 0.125 | (0:30) | 144 | 169 | 315 |
| 0.150 | (0:30) | 184 | 199 | 378 |
| 0.175 | (0:30) | 195 | 231 | 412 |
| 0.200 | (0:30) | 206 | 298 | 483 |
| 0.300 | (0:30) | 240 | 389 | 680 |

| | | | | |
|--------------|--------|-----|-----|------|
| 0.400 | (0:30) | 266 | 588 | 837 |
| 0.500 | (0:30) | 294 | 735 | 1001 |

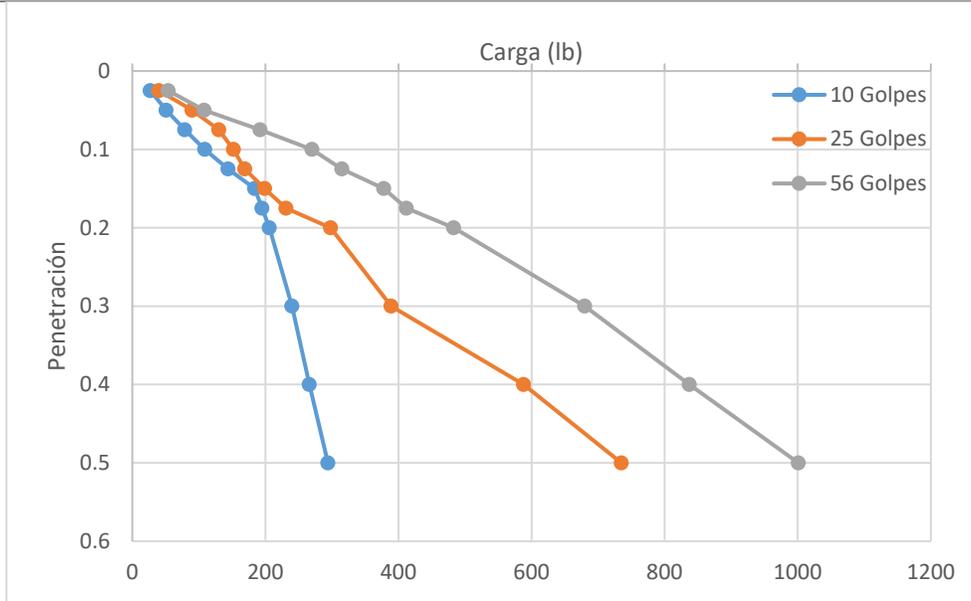


Figura 83 Cargas (Lb) de penetración B4 Moya

Tabla 36 Correcciones de carga de presión B4 Moya

| Molde No. | Presión a 0.1 Pulg | Presión a 0.1 Pulg | CBR a 0.1 Pulg | CBR a 0.2 Pulg |
|-----------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|
| Vc/34-23 | 36.33 | 68.67 | 3.63 | 4.58 |
| Vc/34-11 | 50.67 | 99.33 | 5.07 | 6.62 |
| Vc/34-27 | 90.00 | 161.00 | 9.00 | 10.73 |

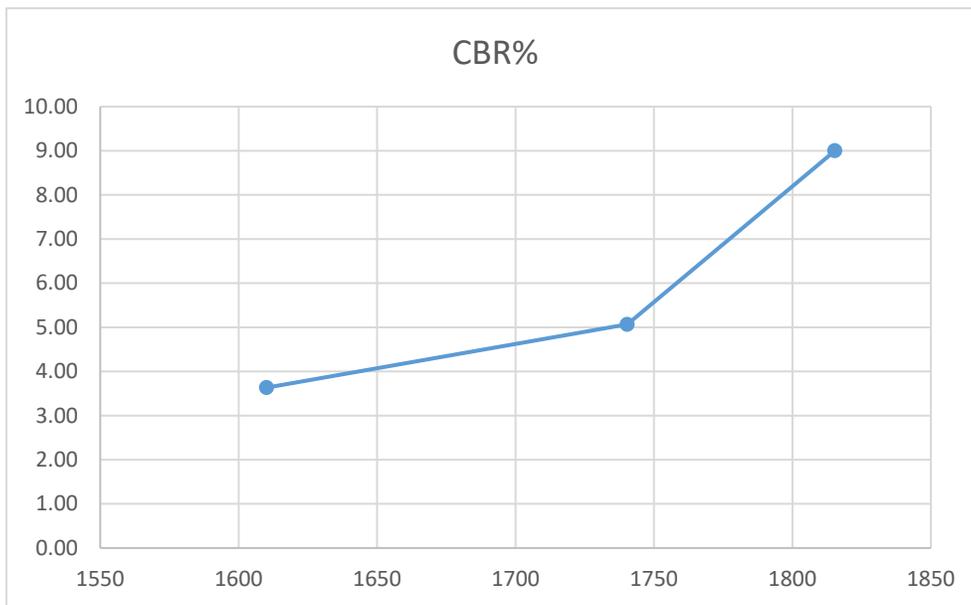


Figura 84 Porcentaje de CBR B4 Moya

Tabla 37 CBR y Expansión B5 Cerritos

| VALOR DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR) Y EXPANSIÓN (EXP) | | | | | |
|--|---|---------|-------|--------|-------|
| 1 | Contenido de agua óptima | % | | | |
| | No. de golpes por capa | | 10 | 25 | 56 |
| 2 | Masa del espécimen secado al horno | (g) | | | |
| 3 | Agua por agregar | (cm3) | | | |
| 4 | Identificación del molde y disco espaciador | | | | |
| 5 | Altura del espécimen de prueba | (mm) | 0.97 | 0.9771 | 0.956 |
| 6 | Masa del molde + suelo compactado | (g) | 11253 | 11484 | 11991 |
| 7 | Masa del molde | (g) | 7068 | 7150 | 7290 |
| 8 | Masa del espécimen | (g) | 4185 | 4334 | 4701 |
| 9 | Volumen efectivo del molde (espécimen) | (cm3) | 2131 | 2114 | 2108 |
| 10 | Masa volumétrica húmeda | (kg/m3) | 1964 | 2050 | 2230 |
| 11 | Masa del molde + suelo saturado | (g) | 11437 | 11606 | 12048 |
| Determinación del Contenido de Agua (Humedad) | | | | | |
| 12 | Identificación del recipiente | | | | |
| 13 | Masa del recipiente + material húmedo | (g) | 632.6 | 675.8 | 822.8 |
| 14 | Masa del recipiente + material seco | (g) | 583.8 | 624.8 | 756.7 |
| 15 | Masa del recipiente | (g) | 109.4 | 129.5 | 120.7 |
| 16 | Masa del agua | (g) | 48.8 | 51 | 66.1 |
| 17 | Masa del material seco | (g) | 474.4 | 495.3 | 636 |
| 18 | Contenido de agua (humedad) | (%) | 10.3 | 10.3 | 10.4 |
| 19 | Masa volumétrica seca | (kg/m3) | 1781 | 1859 | 2020 |
| Expansión | | | | | |
| 20 | Lectura inicial de expansión | | 3 | 4 | 4 |
| 21 | Lectura final de expansión | | 3.1 | 4.1 | 4.2 |
| 22 | Expansión durante la saturación | (%) | 0.02 | 0.02 | 0.04 |
| 23 | Expansión Promedio | (%) | 0.025 | | |

Tabla 38 Registro de Cargas de Penetración B5 Cerritos

| Penetración | | Cargas de Penetración | | |
|--------------|--------|-----------------------|-----------|-----------|
| (Pulg) | Tiempo | Molde No. | | |
| | | 10 golpes | 25 golpes | 56 golpes |
| 0.025 | (0:30) | 60 | 118 | 188 |
| 0.050 | (0:30) | 144 | 221 | 237 |
| 0.075 | (0:30) | 177 | 310 | 424 |
| 0.100 | (0:30) | 204 | 389 | 615 |
| 0.125 | (0:30) | 218 | 468 | 880 |
| 0.150 | (0:30) | 240 | 546 | 994 |
| 0.175 | (0:30) | 255 | 624 | 1075 |
| 0.200 | (0:30) | 272 | 693 | 1206 |
| 0.300 | (0:30) | 310 | 960 | 1600 |

| | | | | |
|--------------|--------|-----|------|------|
| 0.400 | (0:30) | 364 | 1202 | 2006 |
| 0.500 | (0:30) | 412 | 1425 | 2316 |

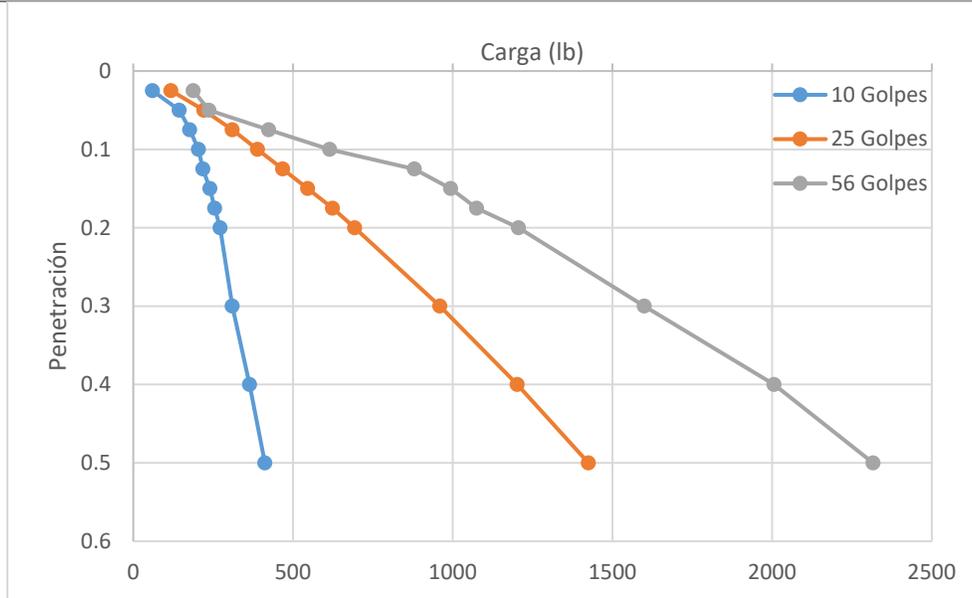


Figura 85 Cargas (Lb) de penetración B5 Cerritos

Tabla 39 Correcciones de carga de presión B5 Cerritos

| Molde No. | Presión a 0.1 Pulg | Presión a 0.1 Pulg | CBR a 0.1 Pulg | CBR a 0.2 Pulg |
|-----------------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|
| Vc/34-23 | 68.00 | 90.67 | 6.80 | 6.04 |
| Vc/34-11 | 129.67 | 231.00 | 12.97 | 15.40 |
| Vc/34-27 | 205.00 | 402.00 | 20.50 | 26.80 |

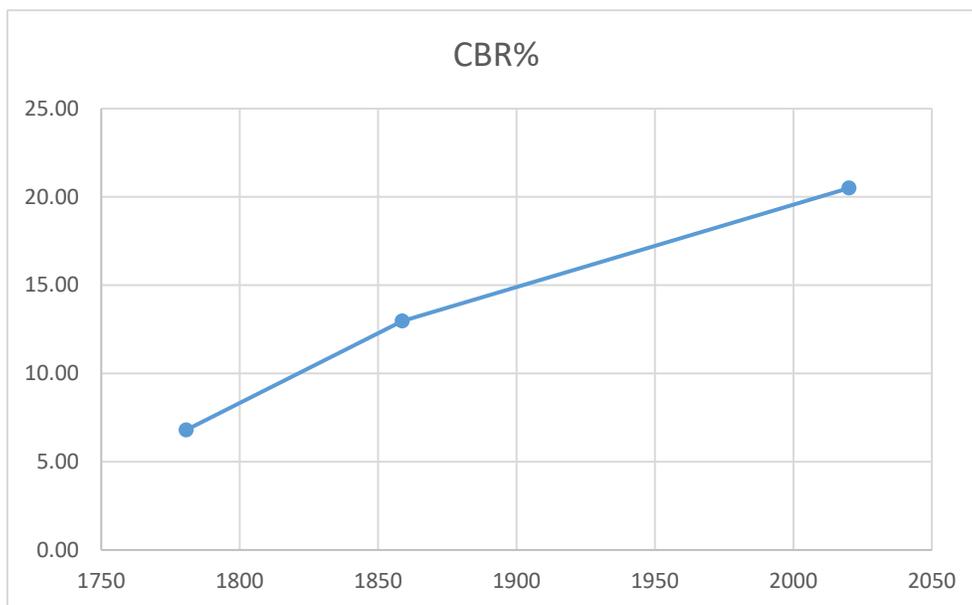


Figura 86 Porcentaje de CBR B5 Cerritos

H) Interpretación CBR

Del Ensayo Valor de Soporte de California (CBR) que se realizó a las muestras de los bancos de suelos obtenidas se determinó su calidad medida en las características de resistencia y deformación de los bancos de suelos a manera de establecer una relación entre su comportamiento y el de los suelos utilizados principalmente como bases, subbases y subrasantes. Los resultados en porcentajes de CBR al 100% fueron de 6.7% para B1 Zayre, 41.5% B2 Cumbres, 24.3% B3 Maqlub, 9.0% B4 Moya y 20.5% para B5 Cerritos, siendo B2 Cumbres el de mejor calidad y mayor soporte apto para utilizarse como calidad subrasante al igual que B3 Maqlub y B5 Cerritos, ya que se encuentran entre el 20-50%, seguido de B4 Moya y B1 Zayre que como su rango se encuentra entre 7-20% al tener un menor soporte podrían ser colocados como material terraplén.

La densidad de la puzolana natural y de la cal, se determinó por medio de un picnómetro Pentapyc 5200e de Quantachrome. En cuanto a la densidad de los suelos se determinó el contenido de agua óptimo (CAO) para cada muestra recolectada, por lo cual se realizó el Ensayo de Compactación Dinámica Estándar y Modificada [58]. De este ensayo se obtuvo la densidad mayor que pueden alcanzar los suelos para su compactación a su correcta condición de humedad. Una vez definidos los parámetros físicos se procedió con la clasificación de los 5 bancos de suelos analizando los resultados obtenidos por estos ensayos y conforme a lo establecido con la Norma ASTM D 2487 06 [59] se clasificaron cada uno de los bancos encontrados.

I) DRX de los suelos

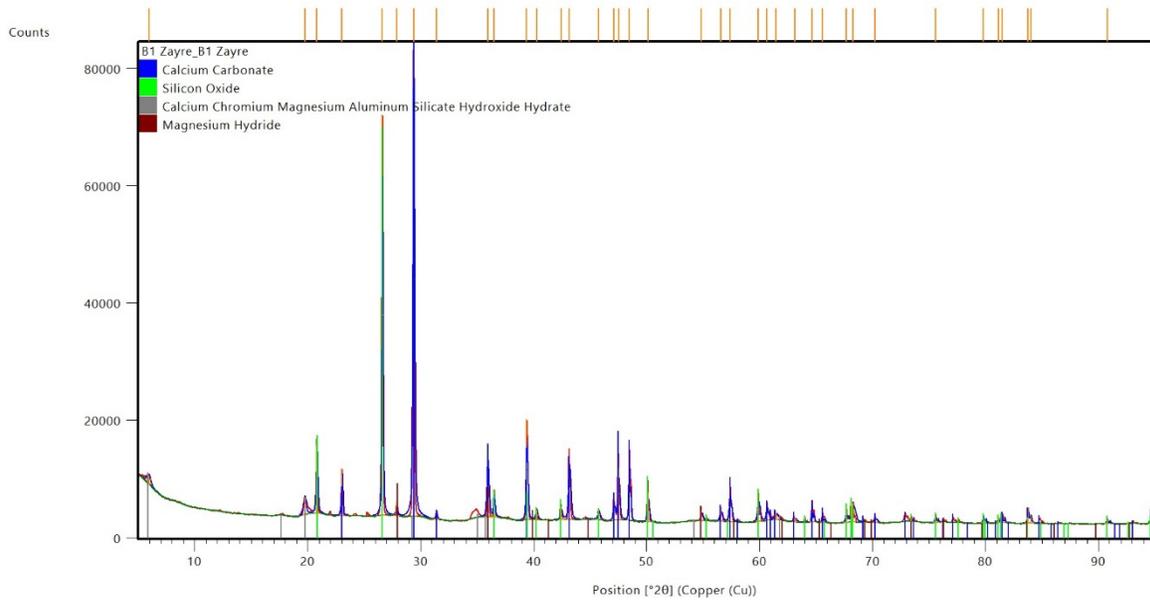


Figura 87 Difractograma B1 Zayre

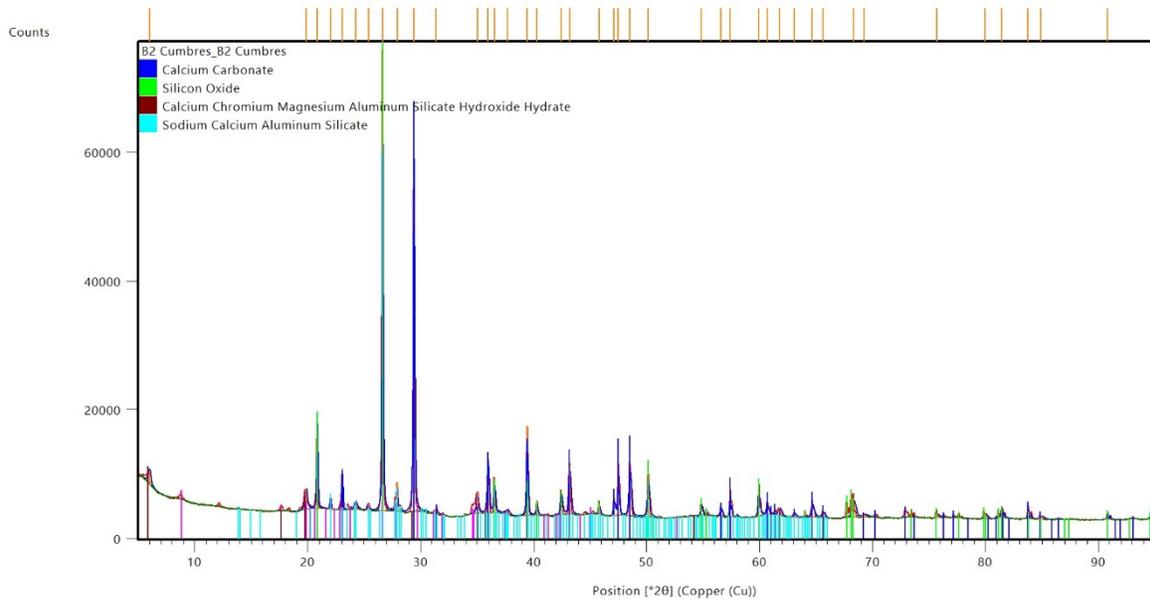


Figura 88 Difractograma B2 Cumbres

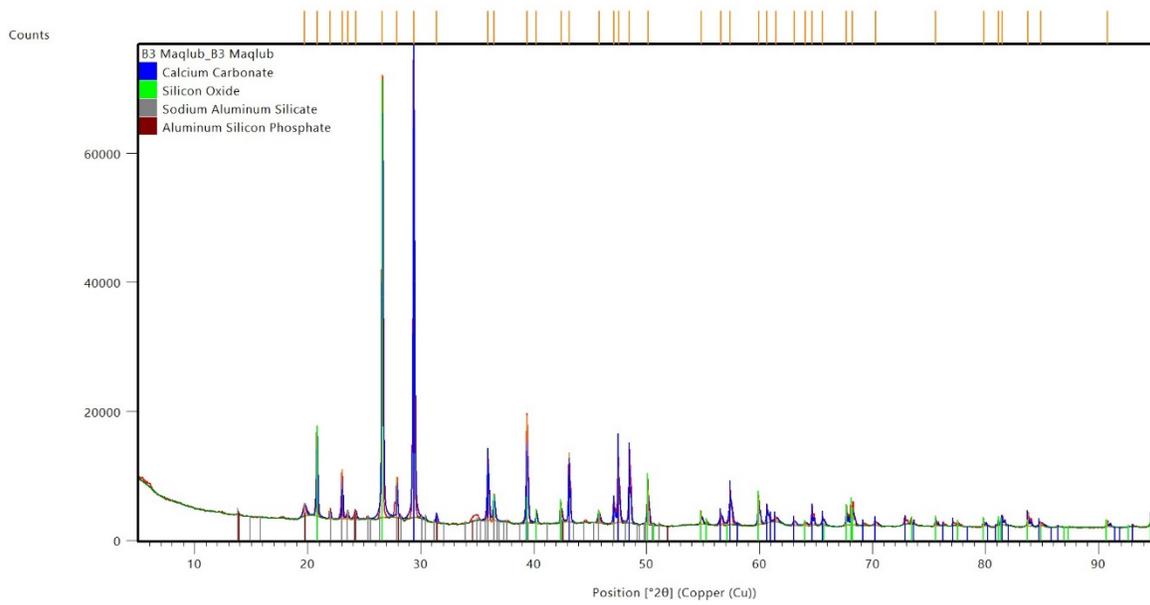


Figura 89 Difractograma B3 Maqlub

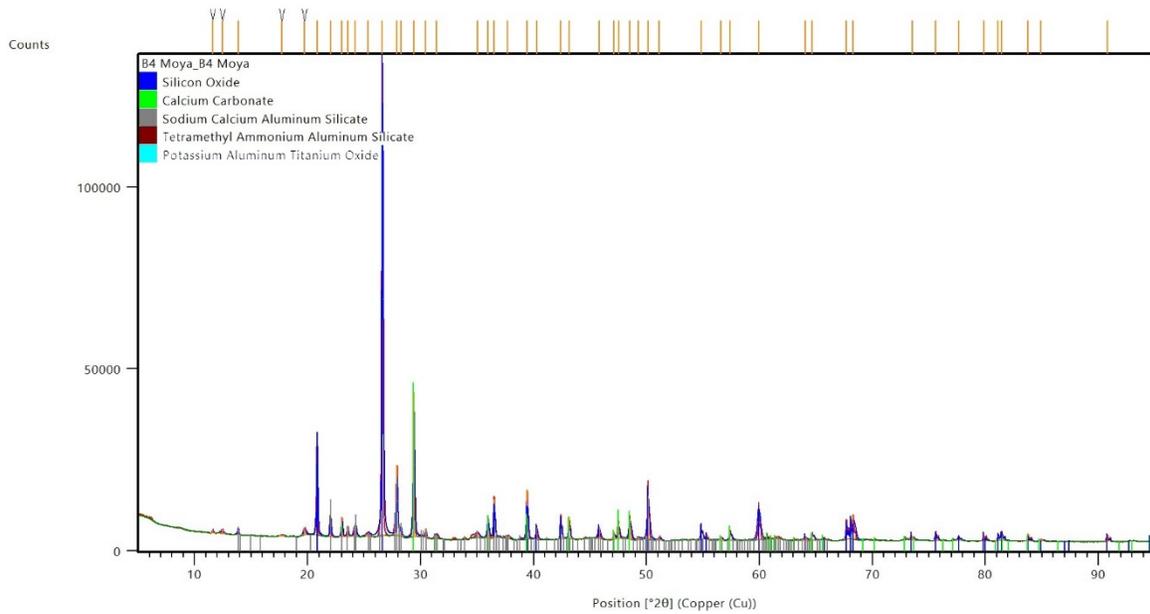


Figura 90 Difractograma B4 Moya

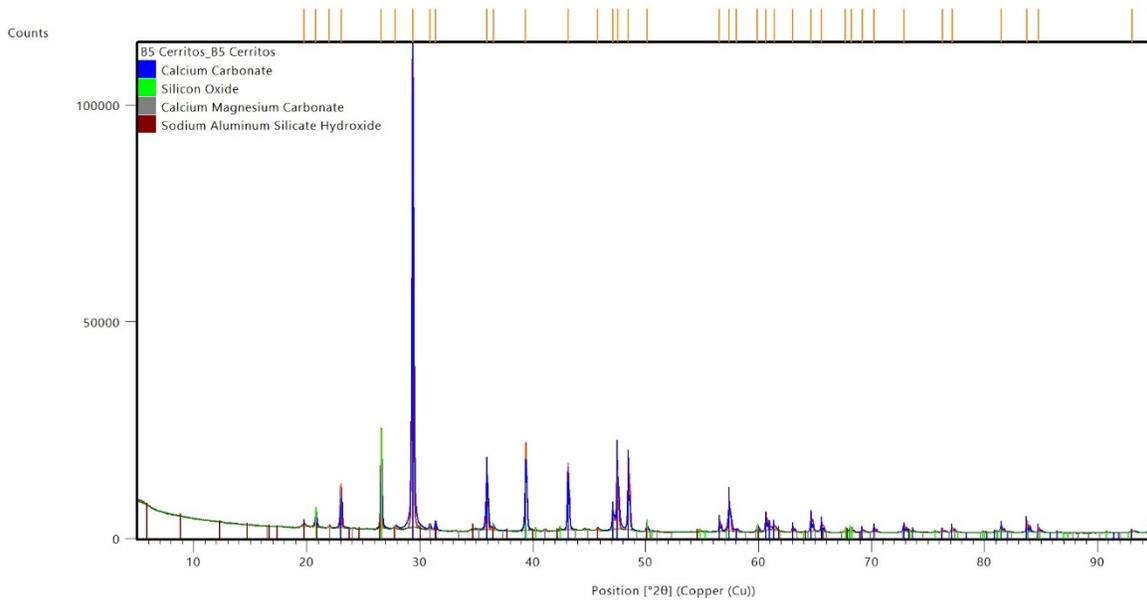


Figura 91 Difractograma B5 Cerritos

J) Clasificación del banco de materiales B1 Zayre

Para la clasificación del banco B1 Zayre en relación con los resultados obtenidos de la granulometría (Figura 62) y los límites de consistencia (Figura 67) se elaboró la tabla de resumen de resultados directos (Tabla 40) que junto con la norma ASTM D 2487-06 se clasifica de la siguiente manera:

Tabla 40 Resumen de resultados B1 Zayre Límites de Consistencia y Granulometría

| Resultados B1 Zayre | | | |
|----------------------------|-------|----------------|-----|
| Límites de Consistencia CL | | Granulometría | |
| Límite Líquido | 35.1% | Grava | 8% |
| Límite Plástico | 15.5% | Arena | 16% |
| Índice Plástico | 19.6% | Finos | 76% |
| Límite de Contracción | 10.9% | % Retenido 200 | 24% |

ASTM D 2487 06

GRAVA: GC, GRAVA ARCILLOSA CON ARENA

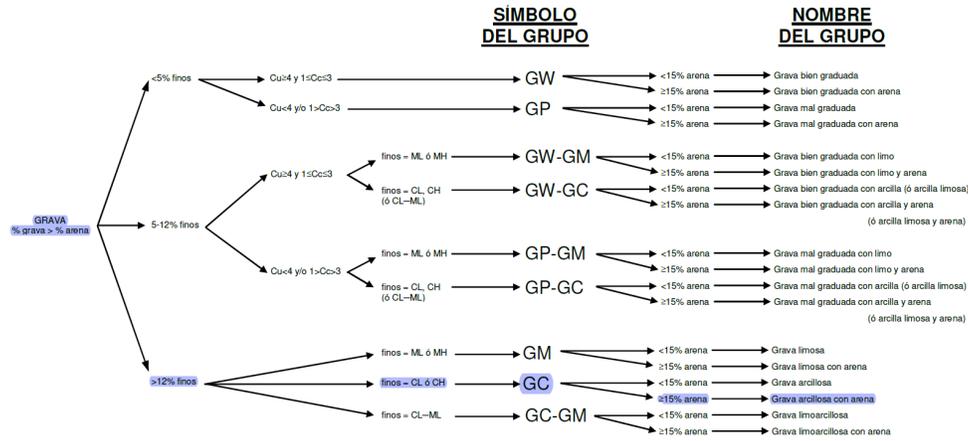


Figura 92 Diagrama de clasificación de Grava ASTM D 2487 06 B1 Zayre

Para clasificar el tipo de grava que contiene el banco B1 Zayre se toman los resultados directos de la tabla 40 y se comparan con el diagrama de clasificación de Grava de la ASTM D 2487-06 de la figura 92, que de las tres opciones de clasificación (<5% finos, 5-12% finos, >12% finos) se remarca “>12% de finos” ya que la granulometría demostró que el B1 contiene 76% de finos (Tabla 40), después, debido a los resultados obtenidos de los límites de consistencia en relación a su carta de plasticidad el banco B1 Zayre se graficó como CL arcilla de baja plasticidad, por lo que remarca “finos= CL o CH”, por esto a su vez las gravas adquieren el símbolo de “GC” remarcado en el diagrama de clasificación, y por último nuevamente de la Tabla 40 se comparan los porcentajes de arena “<15% de arena” o “≥15% de arena” seleccionando ésta última en el diagrama de clasificación obteniendo así GRAVA: GC, GRAVA ARCILLOSA CON ARENA.

ARENA: SC, ARENA ARCILLOSA

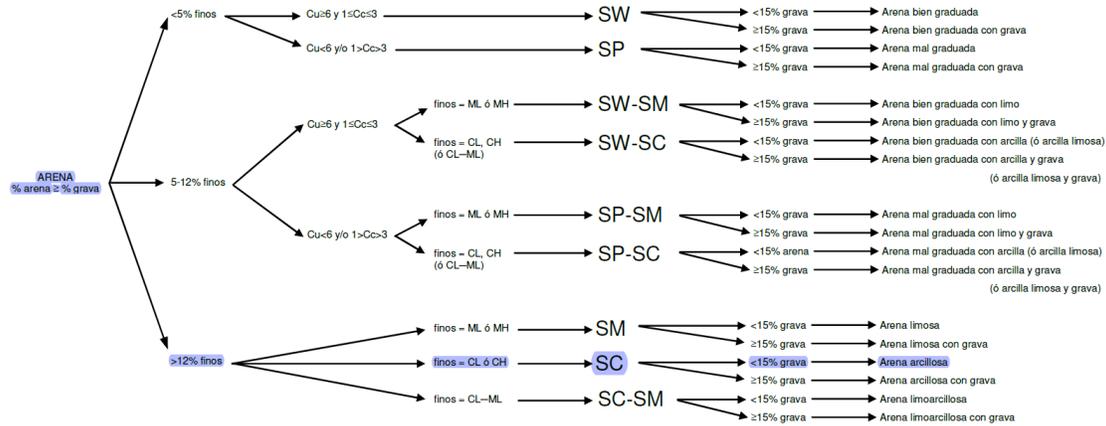


Figura 93 Diagrama de clasificación de Arena ASTM D 2487 06 B1 Zayre

De igual manera para clasificar el tipo de arena que contiene el banco B1 Zayre se toman los resultados directos de la Tabla 40 y se comparan con el diagrama de clasificación de Arena de la ASTM D 2487 06, que de las tres opciones de clasificación (<5% finos, 5-12% finos y >12% finos) se remarca “>12% de finos” ya que la granulometría demostró que el B1 contiene 76% de finos lo cual es mayor al 12% (Tabla 40), después, debido a los resultados obtenidos de los límites de consistencia en relación a su carta de plasticidad el banco B1 Zayre se graficó como CL arcilla de baja plasticidad, por lo que se remarca “finos = CL o CH” del diagrama de clasificación, por esto a su vez la arena adquiere el símbolo de “SC”, y por último nuevamente se comparan los porcentajes de grava “<15% de grava” o “≥15% de grava” seleccionando “<15% de Grava” en el diagrama de clasificación por el 8% obtenido en las pruebas de granulometría presentados en la Tabla 40 de resultados directos es así como se obtiene ARENA: SC, ARENA ARCILLOSA.

FINOS: CL, ARCILLA LIGERA CON ARENA

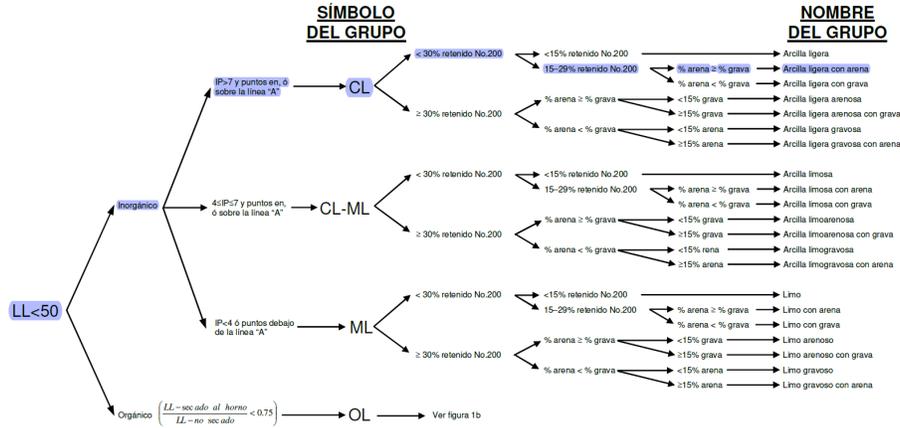


Figura 94 Diagrama de clasificación de Finos ASTM D 2487 06 B1 Zayre

Para clasificar el tipo de finos presentes en el banco B1 Zayre de igual forma se toman los resultados directos de la Tabla 40 y se comparan con el diagrama de clasificación de Finos de la ASTM D 2487 06, tomando la relación de Limite Liquido $LL < 50$ de material Inorgánico, que de las tres opciones de clasificación ($IP > 7$, $4 \leq IP \leq 7$ y $IP \leq 4$) se selecciona “ $IP > 7$ ” al obtener un 19.6% de Índice plástico tomado de la Tabla 40, después se selecciona la opción única “CL” en el diagrama de clasificación y se finaliza comparando los resultados de granulometría $< 30\%$ o $\geq 30\%$ de material retenido en la malla No. 200 que nuevamente de la tabla de resultados directos (Tabla 40) se obtuvo un 24%, seleccionando la primer opción, y ésta quedando entre 15-29% de material retenido obteniendo de esa manera FINOS: CL, ARCILLA LIGERA CON ARENA.

CLASIFICACIÓN SUCS

GC

GRAVAS ARCILLOSAS, MEZCLAS DE GRAVA ARENA Y ARCILLA

SC

ARENAS ARSILLOSAS, MEZCLAS DE ARENA Y ARCILLA

CL

ARCILLAS INORGANICAS DE BAJA A MEDIA PLASTICIDAD, ARCILLAS CON GRAVA, ARCILLAS ARENOSAS, ARCILLAS LIMOSAS, ARCILLAS POBRES

CLASIFICACION VISUAL

ARCILLA LIMOSA CAFÉ CLARO CON GRAVAS Y GRAVILLAS

CL: ARCILLA LIMOSA DE BAJA PLASTICIDAD

K) Clasificación del banco de materiales B2 Cumbres

La clasificación del banco B2 Cumbres de igual manera se realizó con relación a los resultados obtenidos de su granulometría (Figura 63) y sus límites de consistencia (Figura 68) elaborándose la tabla de resumen de resultados directos (Tabla 41) que junto con la norma ASTM D 2487 06 se clasifica de la siguiente manera:

Tabla 41 Resumen de resultados B2 Cumbres Límites de Consistencia y Granulometría

| Resultados B2 Cumbres | | | |
|----------------------------|-------|----------------|-----|
| Límites de Consistencia CL | | Granulometría | |
| Limite Líquido | 40.0% | Grava | 25% |
| Limite plástico | 22.0% | Arena | 39% |
| índice plástico | 18.0% | Finos | 35% |
| Límite de Contracción | 7.6% | % Retenido 200 | 65% |

ASTM D 2487 06

GRAVA: GC, GRAVA ARCILLOSA CON ARENA

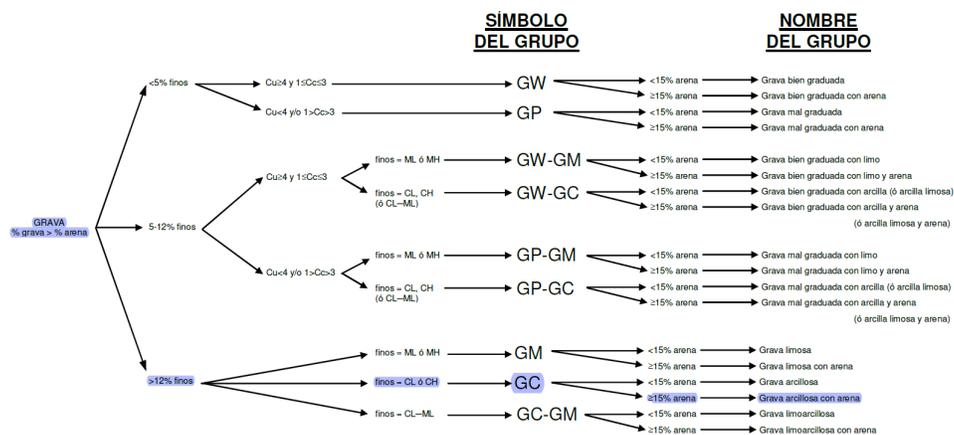


Figura 95 Diagrama de clasificación de Grava ASTM D 2487 06 B2 Cumbres

Para el banco B2 Cumbres se clasificó el tipo de grava de igual manera que el banco B1 tomando los resultados directos de la Tabla 41 y comparando con el diagrama de clasificación de Grava de la ASTM D 2487 06 en la figura 95, que para este caso de las tres opciones de clasificación (<5% finos, 5-12% finos, >12% finos) se selecciona “>12% de finos” ya que la granulometría demostró que B2 Cumbres contiene un 35% de finos (Tabla 41), después, con relación a los resultados obtenidos de los límites de consistencia de la carta de plasticidad B2 Cumbres se graficó como CL arcilla de baja plasticidad, por lo que remarca “finos= CL o CH”, por esto a su vez las gravas adquieren también el símbolo de “GC” seleccionado en el diagrama de clasificación, y por último nuevamente de la Tabla 41 se comparan los porcentajes de arena “<15% de arena” o “≥15% de arena” seleccionando ésta última en el diagrama de clasificación obteniendo así GRAVA: GC, GRAVA ARCILLOSA CON ARENA.

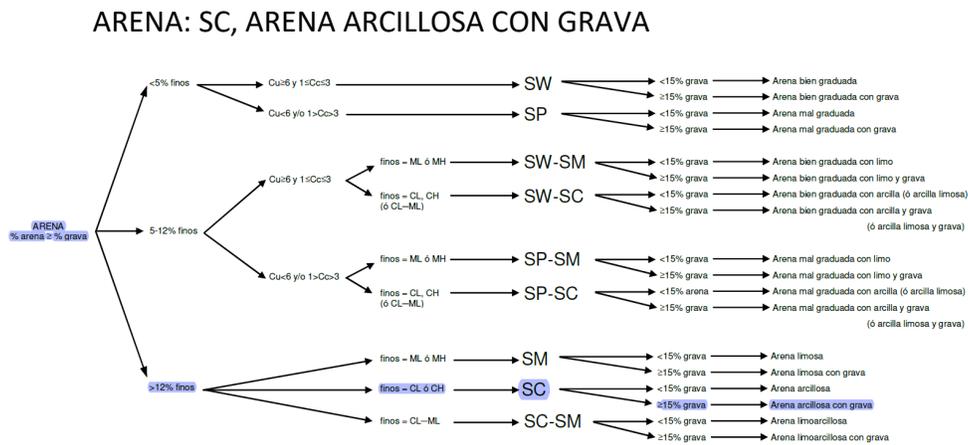


Figura 96 Diagrama de clasificación de Arena ASTM D 2487 06 B2 Cumbres

De la misma forma, para poder clasificar el tipo de arena que contiene el banco B2 Cumbres se realiza con los resultados directos de la Tabla 41 y se comparan con el diagrama de clasificación de Arena de la ASTM D 2487 06, que de las tres opciones de clasificación (<5% finos, 5-12% finos y >12% finos) se remarca “>12% de finos” esto por la granulometría

que presentó con un 35% de finos (Tabla 41) lo cual es mayor al 12% del diagrama, después, se consideran los límites de consistencia en relación a su carta de plasticidad en este caso B2 Cumbres se graficó como “CL arcilla de baja plasticidad”, por lo que se remarca “finos = CL o CH” del diagrama de clasificación, es así que la arena adquiere el símbolo de “SC”, y para finalizar se comparan los porcentajes de grava “<15% de grava” o “≥15% de arena” y se selecciona “≥15% de Grava” en el diagrama de clasificación por el 32% que se registró de las pruebas de granulometría mostradas en la Tabla 41 de resultados directos de esta manera se clasifica como ARENA: SC, ARENA ARCILLOSA CON GRAVA.

FINOS: CL, ARCILLA LIGERA ARENOSA CON GRAVA

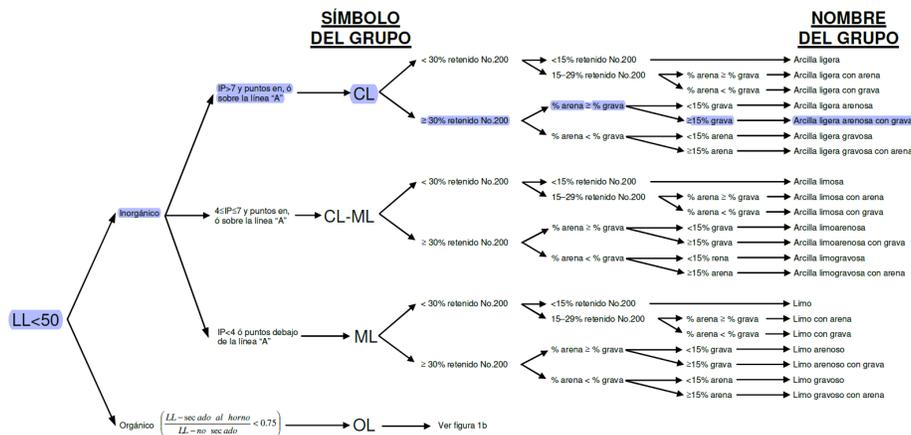


Figura 97 Diagrama de clasificación de Finos ASTM D 2487 06 B2 Cumbres

Para la clasificación del tipo de finos que presenta B2 Cumbres, de los resultados directos de la Tabla 41 se comparan con el diagrama de clasificación de Finos de la ASTM D 2487 06 y tomando la relación de Limite Liquido $LL < 50$ de material Inorgánico, se selecciona “IP>7” de las tres opciones de clasificación (IP>7, $4 \leq IP \leq 7$ y $IP \leq 4$) al obtener un 18% de Índice plástico (Tabla 41), después se selecciona la opción única “CL” del diagrama de clasificación y por último se comparan los resultados de granulometría (<30% y ≥30%) del material retenido en la malla No. 200 de la tabla de resultados directos (Tabla 41) del cuál

se obtuvo un 65%, por lo que se selecciona $\geq 30\%$, teniendo un mayor porcentaje de arena que grava ($\% \text{arena} \geq \% \text{grava}$) siendo 25% el porcentaje de grava y esto $\geq 15\%$ en el diagrama de clasificación (Figura 97) siendo FINOS: CL, ARCILLA LIGERA ARENOSA CON GRAVA.

SUCS

GM

GRAVAS ARCILLOSAS, MEZCLAS DE GRAVA ARENA Y ARCILLA

SC

ARENAS ARSILLOSAS, MEZCLAS DE ARENA Y ARCILLA

CL

ARCILLAS INORGANICAS DE BAJA A MEDIA PLASTICIDAD, ARCILLAS CON GRAVA, ARCILLAS ARTENOSAS, ARCILLAS LIMOSAS, ARCILLAS POBRES

CLASIFICACION VISUAL

ARCILLA LIMOSA

SC: ARENA ARCILLO LIMOSA CON GRAVAS

L) Clasificación del banco de materiales B3 Maclub

El banco B3 Maclub se clasificó con relación a los resultados obtenidos en su granulometría (Figura 64) y en sus límites de consistencia (Figura 69) por lo que se elaboró la tabla de resumen de resultados directos (Tabla 42) que junto con la norma ASTM D 2487 06 se clasifica de la siguiente manera:

Tabla 42 Resumen de resultados B3 Maclub Límites de Consistencia y Granulometría

| Resultados B3 Maclub | | | |
|----------------------------|-------|----------------|-----|
| Límites de Consistencia CL | | Granulometría | |
| Límite Líquido | 26.4% | Grava | 32% |
| Límite Plástico | 17.4% | Arena | 32% |
| Índice Plástico | 9.0% | Finos | 36% |
| Límite de Contracción | 6.0% | % Retenido 200 | 64% |

ASTM D 2487 06

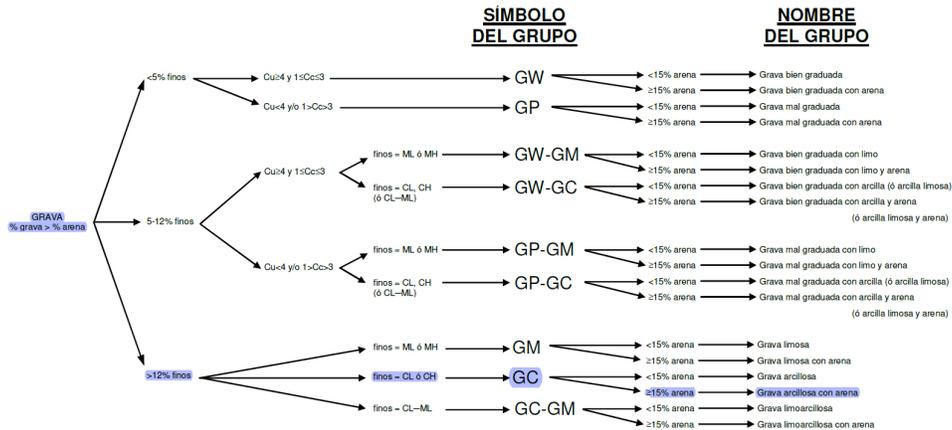
GRAVA: GC, GRAVA ARCILLOSA CON ARENA


Figura 98 Diagrama de clasificación de Grava ASTM D 2487 06 B3 Maqlub

Para clasificar el tipo de grava que constituye el banco B3 Maqlub se toman los resultados directos de la Tabla 42 y se comparan con el diagrama de clasificación de Grava de la ASTM D 2487 06, que de las tres opciones de clasificación (<5% finos, 5-12% finos, >12% finos) se remarca “>12% de finos” ya que la granulometría demostró que el B3 presenta un 36% de finos (Tabla 42), después, conforme a los resultados de los límites de consistencia y en relación a su carta de plasticidad el banco B3 Maqlub se graficó como CL arcilla de baja plasticidad, por lo que se remarca “finos= CL o CH”, por esto a su vez las gravas adquieren el símbolo de “GC” remarcado en el diagrama de clasificación, y por último en la Tabla 42 se comparan los porcentajes de arena “<15% de arena” o “≥15% de arena” seleccionando “≥15% de arena” en el diagrama de clasificación obteniendo así GRAVA: GC, GRAVA ARCILLOSA CON ARENA.

ARENA: SC, ARENA ARCILLOSA CON GRAVA

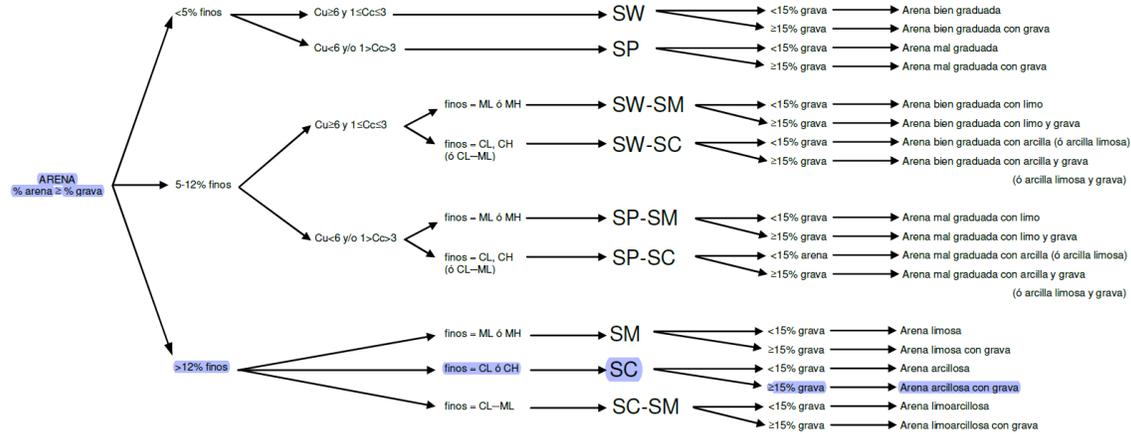


Figura 99 Diagrama de clasificación de Arena ASTM D 2487 06 B3 Maqlub

Para clasificar el tipo de arena que contiene el banco B3 Maqlub se toman los resultados directos de la Tabla 42 y se comparan con el diagrama de clasificación de Arena de la ASTM D 2487 06 (Figura 99), que dentro de sus tres opciones de clasificación (<5% finos, 5-12% finos y >12% finos) se escoge “>12% de finos” ya que la granulometría demostró que B3 Maqlub contiene 36% de finos lo cual es mayor al 12%, después, con relación a los resultados obtenidos de los límites de consistencia y su carta de plasticidad el banco B3 Maqlub se graficó como CL arcilla de baja plasticidad, por lo que se remarca “finos = CL o CH” del diagrama de clasificación de la figura 100, por esto a su vez la arena adquiere el símbolo de “SC”, y por último nuevamente se comparan los porcentajes de grava “<15% de grava” o “≥15% de arena” seleccionando “≥15% de Grava” en el diagrama de clasificación por el 32% obtenido en las pruebas de granulometría presentados en la Tabla 42 de resultados directos, es así como se obtiene ARENA: SC, ARENA ARCILLOSA CON GRAVA.

FINOS: CL, ARCILLA LIGERA ARENOSA CON GRAVA

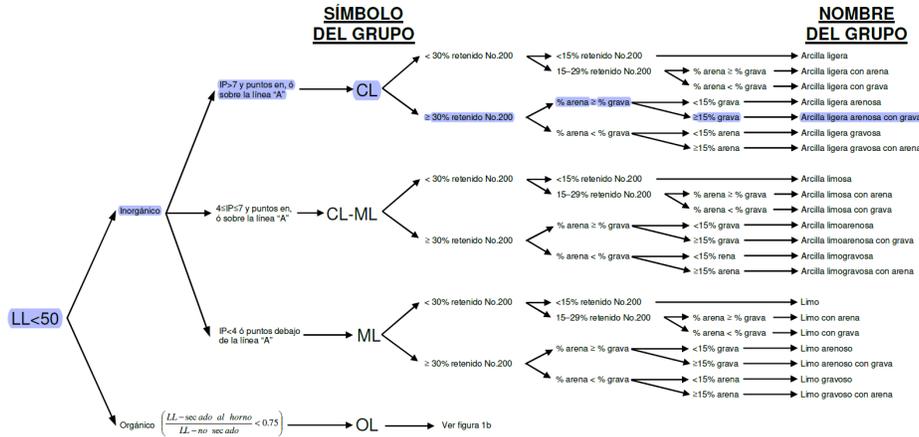


Figura 100 Diagrama de clasificación de Finos ASTM D 2487 06 B3 Maqlub

Para la clasificación del tipo de finos presentes en el banco B3 Maqlub de igual forma se toman los resultados directos de la Tabla 42 y se comparan con el diagrama de clasificación de Finos de la ASTM D 2487 06 (Figura 100), tomando la relación de Limite Liquido $LL < 50$ de material Inorgánico, que de las tres opciones de clasificación ($IP > 7$, $4 \leq IP \leq 7$ y $IP \leq 4$) se selecciona “ $IP > 7$ ” al obtener un 9.0% de Índice plástico tomado de la Tabla 42, después se selecciona la opción única “CL” en el diagrama de clasificación y se finaliza comparando los resultados de granulometría $< 30\%$ o $\geq 30\%$ de material retenido en la malla No. 200 que nuevamente de la tabla de resultados directos (Tabla 42) se obtuvo un 64%, seleccionando la segunda opción, y en ésta siendo igual los porcentajes de grava y arena (32%) se selecciona “ $\%grava \geq \%arena$ ” y “ $\geq 15\%$ ” de grava por esta razón se obtiene FINOS: CL, ARCILLA LIGERA ARENOSA CON GRAVA.

CLASIFICACIÓN SUCS

GC

GRAVAS ARCILLOSAS, MEZCLAS DE GRAVA ARENA Y ARCILLA

SC

ARENAS ARSILLOSAS, MEZCLAS DE ARENA Y ARCILLA

CL

ARCILLAS INORGANICAS DE BAJA A MEDIA PLASTICIDAD, ARCILLAS CON GRAVA, ARCILLAS ARTENOSAS, ARCILLAS LIMOSAS, ARCILLAS POBRES

CLASIFICACION VISUAL

ARCILLA CAFÉ CLARO CON GRAVAS REDONDEADAS

CL: ARCILLA DE BAJA PLASTICIDAD ARENOSA CON GRAVAS

M) Clasificación del banco de materiales B4 Moya

Tabla 43 Resumen de resultados B4 Moya Límites de Consistencia y Granulometría

| Resultados B4 Moya | | | |
|----------------------------|-------|----------------|-----|
| Límites de Consistencia ML | | Granulometría | |
| Limite Líquido | 16.8% | Grava | 1% |
| Limite Plástico | 14.5% | Arena | 28% |
| Índice Plástico | 2.3% | Finos | 72% |
| Límite de Contracción | 1.7% | % Retenido 200 | 28% |

ASTM D 2487 06

GRAVA: GM, GRAVA LIMOSA CON ARENA

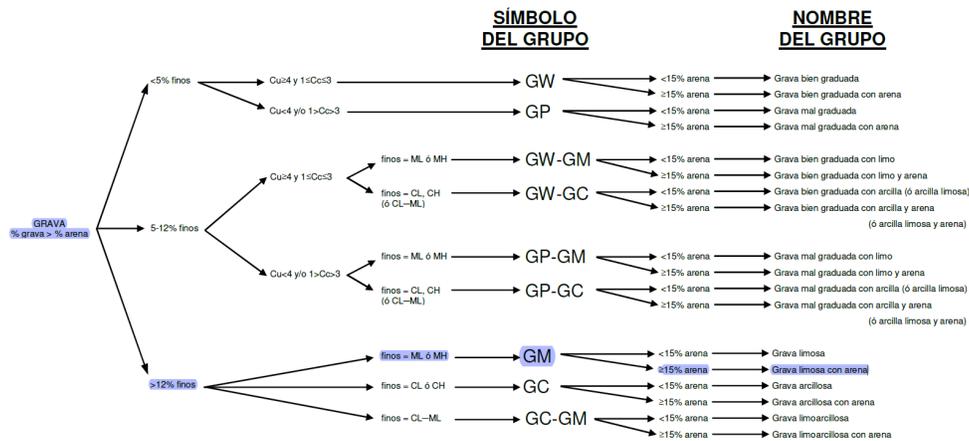


Figura 101 Diagrama de clasificación de Grava ASTM D 2487 06 B4 Moya

Para la clasificación del banco B4 Moya se clasificó el tipo de grava tomando los resultados directos de la Tabla 43 y comparando con el diagrama de clasificación de Grava

de la ASTM D 2487 06 (Figura 101), que de las tres opciones de clasificación (<5% finos, 5-12% finos, >12% finos) se selecciona “>12% de finos” pues B4 Moya presentó un 72% de finos (Tabla 43), después, con relación a los resultados obtenidos de los límites de consistencia de la carta de plasticidad B4 Moya se graficó como ML Limo de baja plasticidad, por lo que se remarca “finos= ML o MH”, por esto a su vez las gravas adquieren también el símbolo de “GM” seleccionado en el diagrama de clasificación de la figura 101, y por último nuevamente de la Tabla 43 se comparan los porcentajes de arena “<15% de arena” o “≥15% de arena” seleccionando ésta última en el diagrama de clasificación obteniendo así GRAVA: GM, GRAVA LIMOSA CON ARENA.

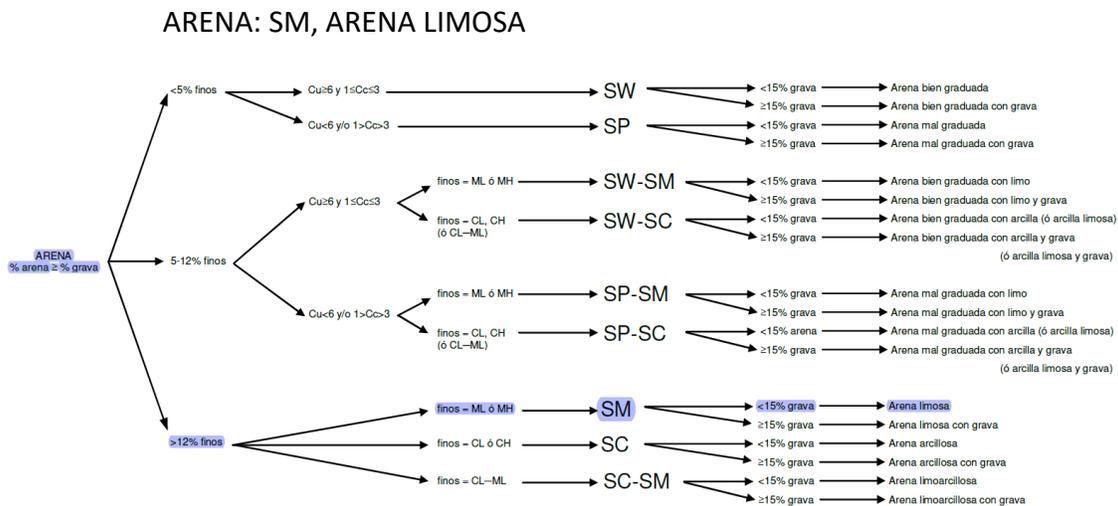


Figura 102 Diagrama de clasificación de Arena ASTM D 2487 06 B4 Moya

La clasificación del tipo de arena que contiene el banco B4 Moya se realiza con los resultados directos de la Tabla 43 y de igual manera se comparan con el diagrama de clasificación de Arena de la ASTM D 2487 06 (Figura 102), que de las tres opciones de clasificación (<5% finos, 5-12% finos y >12% finos) se remarca “>12% de finos” ya que en su granulometría se obtuvo 35% de finos (Tabla 43), después, se considerando los límites de consistencia y en relación a su carta de plasticidad B4 Moya se graficó como “ML Limo de

baja plasticidad”, por lo que se remarca “finos = ML o MH” en el diagrama de clasificación, es así que la arena adquiere el símbolo de “SM”, y por último al comparar los porcentajes de grava “<15% de grava” o “≥15% de arena” se selecciona “<15% de Grava” en el diagrama de clasificación por el 1% obtenidos de las pruebas de granulometría mostradas en la Tabla 43 de resultados directos de esta manera se clasifica como ARENA: SM, ARENA LIMOSA.

FINOS: ML, LIMO CON ARENA

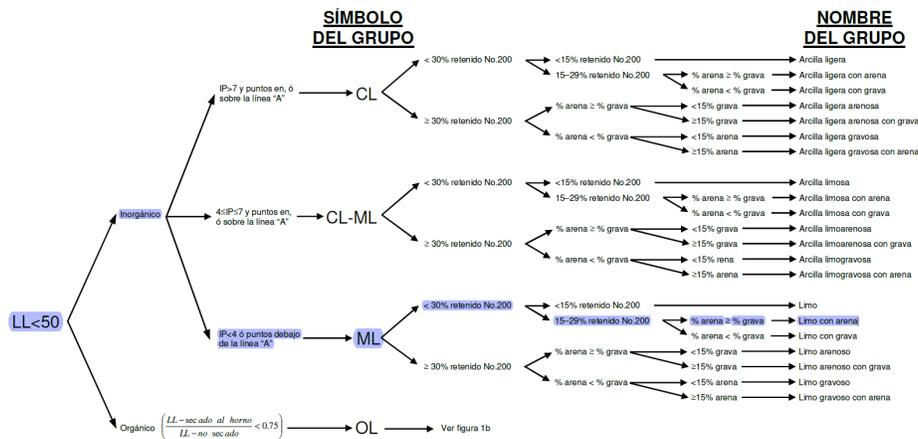


Figura 103 Diagrama de clasificación de Finos ASTM D 2487 06 B4 Moya

Para la clasificación del tipo de finos que presenta B4 Moya, de los resultados directos de la Tabla 43 se comparan con el diagrama de clasificación de Finos de la ASTM D 2487 06 (Figura 103), además tomando la relación de Limite Liquido LL<50 de material Inorgánico, se selecciona “IP<4” de las tres opciones de clasificación (IP>7, 4≤IP≤7 y IP≤4) al obtener un 2.3% de Índice plástico de la Tabla 43, seguido de esto se selecciona la opción única “ML” del diagrama de clasificación y por último se comparan los resultados de granulometría (<30% y ≥30%) del material retenido en la malla No. 200 de la tabla de resultados directos (Tabla 43) del cuál se retuvo 28%, por lo que se selecciona <30%, y esto quedado entre el 15-29% del retenido siendo “%arena≥%grava” de este manera se obtiene FINOS: ML, LIMO CON ARENA.

SUCS

GM

GRAVAS LIMOSAS, MEZCLAS DE GRAVA, ARENA Y LIMO

SM

ARENAS LIMOSAS, MEZCLAS DE ARENA Y LIMO

ML

LIMOS INORGANICOS, POLVO DE ROCA, LIMOS ARENOSOS O ARCILLOSOS

LIGERAMENTE PLASTICOS

CLASIFICACION VISUAL

LIMO ARCILLOSO CAFÉ CON GRAVILLAS AISLADAS

ML: LIMO ARCILLOSO LIGERAMENTE PLÁSTICO

N) Clasificación del banco de materiales B5 Cerritos

Tabla 44 Resumen de resultados B5 Cerritos Límites de Consistencia y Granulometría

| Resultados B5 Cerritos | | | |
|----------------------------|-------|----------------|-----|
| Límites de Consistencia CL | | Granulometría | |
| Limite Líquido | 29.5% | Grava | 62% |
| Limite Plástico | 18.4% | Arena | 22% |
| Índice Plástico | 11.1% | Finos | 16% |
| Límite de Contracción | 5.2% | % Retenido 200 | 84% |

ASTM D 2487 06

GRAVA: GC, GRAVA ARCILLOSA CON ARENA

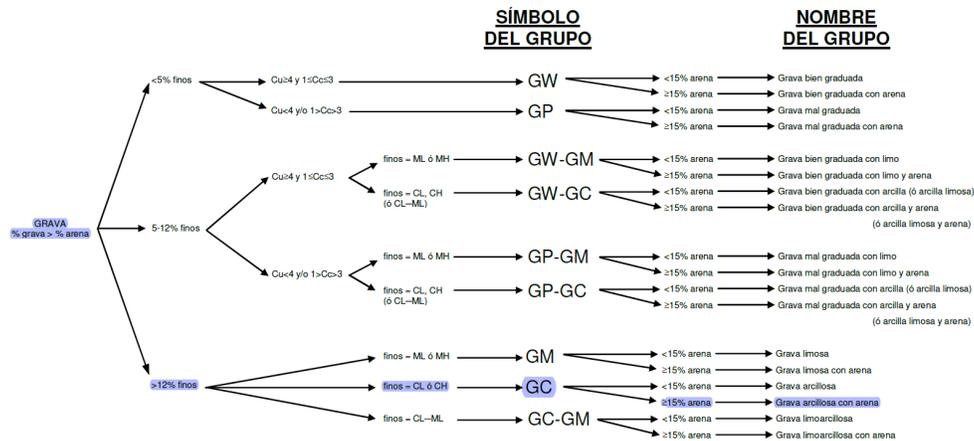


Figura 104 Diagrama de clasificación de Grava ASTM D 2487 06 B5 Cerritos

Para clasificar el tipo de grava que contiene el banco B5 Cerritos se toma los resultados directos de la Tabla 44 y se comparan con el diagrama de clasificación de Grava de la ASTM D 2487 06 de la figura 104, que de las tres opciones de clasificación (<5% finos, 5-12% finos, >12% finos) se remarca “>12% de finos” ya que la granulometría demostró que el banco B5 Cerritos contiene 16% de finos (Tabla 44), después, debido a los resultados obtenidos de los límites de consistencia en relación a su carta de plasticidad el banco B1 Zayre se graficó como CL arcilla de baja plasticidad, por lo que remarca “finos= CL o CH”, por esto a su vez las gravas adquieren el símbolo de “GC” remarcado en el diagrama de clasificación, y por último nuevamente de la Tabla 44 se comparan los porcentajes de arena “<15% de arena” o “≥15% de arena” seleccionando ésta última en el diagrama de clasificación obteniendo así GRAVA: GC, GRAVA ARCILLOSA CON ARENA.

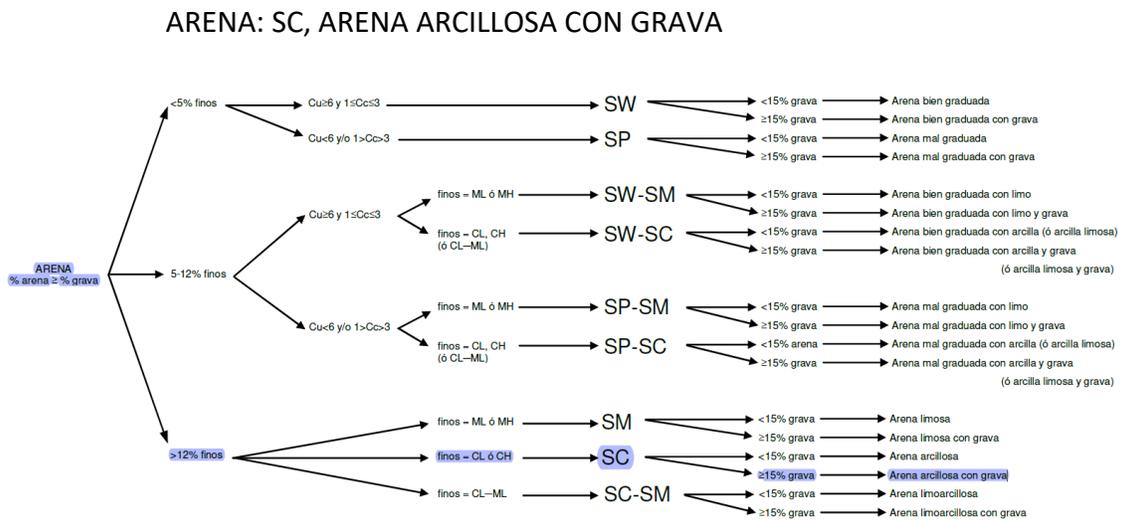


Figura 105 Diagrama de clasificación de Arena ASTM D 2487 06 B5 Cerritos

Del mismo modo para clasificar el tipo de arena que contiene el banco B5 Cerritos se toman los resultados directos de la Tabla 44 y se comparan con el diagrama de clasificación de Arena de la ASTM D 2487 06 (Figura 105), que de las tres opciones de clasificación (<5%

finos, 5-12% finos y >12% finos) se remarca “>12% de finos” ya que la granulometría demostró que el banco B5 Cerritos contiene 16% de finos lo cual es mayor al 12% de la Tabla 44, después, debido a los resultados obtenidos de los límites de consistencia en relación a su carta de plasticidad el banco B5 Cerritos se graficó como CL arcilla de baja plasticidad, por lo que se remarca “finos = CL o CH” del diagrama de clasificación, por esto a su vez la arena adquiere el símbolo de “SC”, y por último nuevamente se comparan los porcentajes de grava “<15% de grava” o “≥15% de grava” seleccionando “≥15% de Grava” en el diagrama de clasificación por el 62% obtenido en las pruebas de granulometría presentados en la Tabla 44 de resultados directos es así como se obtiene ARENA: SC, ARENA ARCILLOSA CON GRAVA.

FINOS: CL, ARCILLA LIGERA GRAVOSA CON ARENA

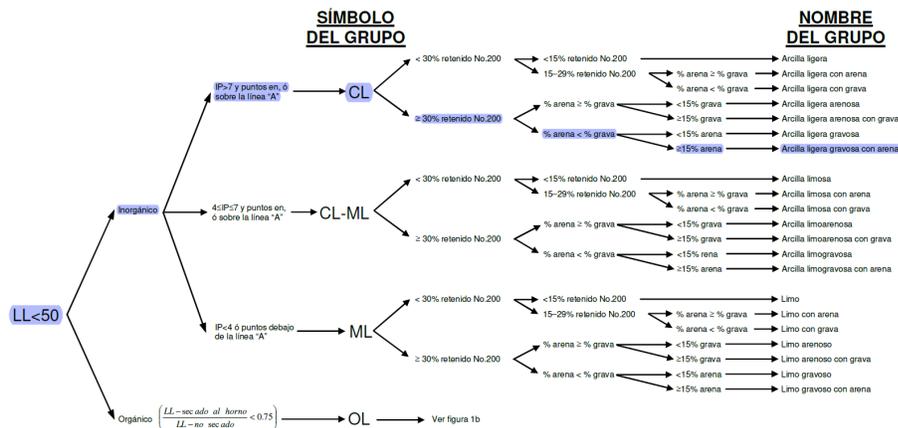


Figura 106 Diagrama de clasificación de Finos ASTM D 2487 06 B5 Cerritos

Para clasificar el tipo de finos presentes en el banco B5 Maqlub de igual forma se toman los resultados directos de la Tabla 44 y se comparan con el diagrama de clasificación de Finos de la ASTM D 2487 06 de la figura 106, tomando la relación de Limite Liquido LL<50 de material Inorgánico, que de las tres opciones de clasificación (IP>7, 4≤IP≤7 y IP≤4) se selecciona “IP>7” al obtener un 11.1% de Índice plástico tomado de la Tabla 44, después se selecciona la opción única “CL” en el diagrama de clasificación y se finaliza

comparando los resultados de granulometría $<30\%$ o $\geq 30\%$ de material retenido en la malla No. 200 que nuevamente de la Tabla 44 de resultados directos se obtuvo un 84%, seleccionando la segunda opción, y siendo $\% \text{arena} < \% \text{grava}$ y $\geq 15\% \text{arena}$ obteniendo de esa manera FINOS: CL, ARCILLA LIGERA GRAVOSA CON ARENA.

SUCS

GC

GRAVAS ARCILLOSAS, MEZCLAS DE GRAVA ARENA Y ARCILLA

SC

ARENAS ARCILLOSAS, MEZCLAS DE ARENA Y ARCILLA

CL

ARCILLAS INORGANICAS DE BAJA A MEDIA PLASTICIDAD, ARCILLAS CON GRAVA, ARCILLAS ARTENOSAS, ARCILLAS LIMOSAS, ARCILLAS POBRES

CLASIFICACION VISUAL

ARCILLA LIMOSA CAFÉ CLARO CON GRAVAS Y GRAVILLAS

GC: GRAVA ARCILLOSA CON ARENA