



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
CIVIL – GEOTECNIA

ESTABILIZACIÓN DE SUELOS SUPERFICIALES
DEL NAICM CON ÓXIDO DE CALCIO (CaO)

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
MARIO EDGAR AMAYA NAVARRETE

TUTOR PRINCIPAL
DR. EDUARDO BOTERO JARAMILLO
INSTITUTO DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. OCTUBRE 2017

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. OVANDO SHELLEY EFRAÍN
Secretario: DR. RIVERA CONSTANTINO RIGOBERTO
Vocal: DR. BOTERO JARAMILLO EDUARDO
1^{er.} Suplente: DR. FLORES CASTRELLÓN OSVALDO
2^{do.} Suplente: DRA. OSSA LÓPEZ ALEXANDRA

Lugar donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

DR. EDUARDO BOTERO JARAMILLO

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A Dios por brindarme las herramientas necesarias para luchar y conseguir mis ideales.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Al Dr. Eduardo Botero Jaramillo, por la confianza, profesionalismo y asesoría en la dirección de esta tesis.

Al Dr. Efraín Ovando Shelley y a la Dra. Alexandra Ossa López por sus acertadas intervenciones y aportaciones realizadas durante el desarrollo de este proyecto.

Al Dr. Osvaldo Flores Castrellón por sus valiosos aportes y comentarios durante el desarrollo de esta tesis.

Al Dr. Mario Flores Guzmán y al Ing. Francisco Armando Rangel Ordoñez por su tiempo invertido y sus valiosos consejos en el desarrollo de este proyecto.

Al Dr. Rigoberto Rivera Constantino, por el tiempo invertido y aportaciones realizadas en la revisión de esta tesis.

A la Asociación Nacional de Fabricantes de Cal, A. C. (ANFACAL) y a todo su equipo, por brindarme su comprensión, apoyo y confianza para realizar este proyecto exitosamente.

A la Quím. María Patricia Girón García del Instituto de Geología de la UNAM y al Dr. Omar Novelo Peralta del Instituto de Materiales de la UNAM, por su tiempo invertido en el desarrollo de esta investigación.

A mis padres y mi familia por su apoyo incondicional, respeto y palabras de aliento durante mis estudios de maestría.

A mi esposa por ser mi pilar fundamental de aliento y esfuerzo, por brindarme todo su apoyo, confianza y amor para cumplir una meta más en común.

A mis hijas por ser mi motor de motivación para superarme cada día y lograr un futuro mejor.

RESUMEN

Los materiales que conforman el subsuelo dentro del polígono del NAICM son característicos y propios de la génesis del Ex Lago de Texcoco, constituidos principalmente por arcillas de alta compresibilidad. Generalmente los principales problemas asociados a este tipo de suelos son la baja resistencia, la alta compresibilidad, la expansión y la susceptibilidad a la erosión. Tales características categorizan a estos materiales como inapropiados en la construcción como el acondicionamiento de caminos provisionales; sin embargo, pueden modificarse sus propiedades fisicoquímicas y convertirlos en materiales propicios. El estudio realizado se enfoca en la estabilización química mediante la adición de Óxido de Calcio (CaO) y en la densificación de los materiales.

Los materiales (arcillas) se sometieron a un programa exhaustivo de pruebas de laboratorio para su análisis, previo y posterior a la adición de CaO. Las pruebas de laboratorio consideradas son: límites de Atterberg, pruebas de compactación (Proctor Estándar), resistencia a la compresión simple (Unconfined Compressive Strength, UCS), Valor Soporte de California (California Bearing Ratio, CBR), pruebas triaxiales no drenadas no consolidadas (Unconsolidated-Undrained, UU), pruebas químicas como la prueba Eades & Grim y análisis con Rayos X (RX), por fluorescencia (FRX) y por difracción (DRX). El estudio se concreta en la estabilización química de las arcillas mediante la determinación del porcentaje óptimo de CaO para lograr la estabilización de las mezclas, la resistencia y su evolución a distintos periodos de curado.

Los resultados obtenidos en la investigación demuestran que con la adición de CaO a los materiales arcillosos se crean un material con características físicas y químicas suficientes que garantizan su buen desempeño en la construcción y en este caso en particular, sin limitar otros aspectos, en la construcción de terracerías, caminos de acceso y plataformas de trabajo. La estabilización de suelos a corto plazo induce el secado de los materiales lo que permite tener materiales desmenuzables y de mayor trabajabilidad. A largo plazo la reacción química genera una reacción puzolánica similar a la de un cemento Portland, lo que provoca el incremento significativo en la resistencia a través del tiempo de curado, además de la reducción drástica de los cambios volumétricos ocasionados por el agua.

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	iii
CONTENIDO	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
INTRODUCCIÓN	1
PLANTEAMIENTO Y ALCANCES DE LA TESIS	1
OBJETIVOS GENERALES	2
OBJETIVOS PARTICULARES	2
ESTRUCTURA Y CAPÍTULOS	2
ESTADO DEL ARTE	4
CAPÍTULO 1	5
1. EL NAICM	5
1.1. EL SUBSUELO DEL EX LAGO DE TEXCOCO.....	5
1.2. PROBLEMÁTICA	6
1.3. PROPUESTA DE SOLUCIÓN	6
1.4. TRABAJOS DE CAMPO.....	7
CAPÍTULO 2	9
2. LA CAL	9
2.1. EMPLEO DE LA CAL EN LA HISTORIA DE LA HUMANIDAD	9
2.2. GENERALIDADES Y DEFINICIÓN DE CAL	9
2.3. PROCESO DE ELABORACIÓN DE LA CAL	10
2.4. QUÍMICA DE LA CAL Y SUS EFECTOS PUZOLÁNICOS	12
2.5. MEJORAMIENTO DE SUELOS ARCILLOSOS CON CAL.....	12
2.6. EFECTOS DE LA CAL SOBRE MATERIALES ARCILLOSOS	15
2.7. EFECTOS QUÍMICOS EN LA ESTABILIZACIÓN CON ÓXIDO DE CALCIO (CaO) EN SUELOS ARCILLOSOS.....	15
2.8. FACTORES QUE AFECTAN LA ESTABILIZACIÓN CON CAL	16
2.9. CaO EMPLEADO EN LA INVESTIGACIÓN	16

CAPÍTULO 3	17
3. CARACTERIZACIÓN DE SUELOS	17
3.1. NORMATIVIDAD	17
3.2. GENERALIDADES	17
3.3. DEFINICIONES	18
3.4. CONSIDERACIONES DE EJECUCIÓN Y DE ANÁLISIS	19
3.5. TRABAJOS DE LABORATORIO	21
3.5.1. Muestras de suelo analizadas.....	21
3.5.2. Variación del IP y w_p	21
3.5.3. Límites de Atterberg y su variación por la adición de CaO.....	22
3.5.4. Límites de Atterberg y su determinación por cono sueco.	24
3.5.5. Densidad de sólidos.....	26
3.5.6. Límites de Atterberg y su determinación por cono sueco, para muestras inalteradas.....	27
3.5.7. Carta de plasticidad.	27
3.6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	28
CAPÍTULO 4	31
4. COMPACTACIÓN DE SUELOS	31
4.1. NORMATIVIDAD	31
4.2. GENERALIDADES	31
4.3. DEFINICIONES	32
4.4. CONSIDERACIONES DE EJECUCIÓN Y DE ANÁLISIS	34
4.4.1. Compactación dinámica en molde miniatura.....	35
4.5. TRABAJOS DE LABORATORIO	36
4.5.1. Curvas de compactación para porcentajes de CaO variables o “Curva por deshidratación química”.	37
4.5.2. Curvas de compactación para porcentajes de CaO constantes, “Curva por deshidratación química y secado ambiente”.	39
4.6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	45
CAPÍTULO 5	47
5. PRUEBA QUÍMICA EADES & GRIM Y DE RX	47
5.1. NORMATIVIDAD	47
5.2. GENERALIDADES	47
5.3. DEFINICIONES	50
5.4. CONSIDERACIONES DE EJECUCIÓN Y DE ANÁLISIS	52
5.5. TRABAJOS DE LABORATORIO	52
5.5.1. Prueba Eades & Grim para las tres muestras analizadas.	52
5.6. FRX.....	54
5.7. DRX.....	54
5.8. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	55

CAPÍTULO 6	57
6. PRUEBA CBR Y DE EXPANSIÓN	57
6.1. NORMATIVIDAD	57
6.2. GENERALIDADES	57
6.3. DEFINICIONES	58
6.4. CONSIDERACIONES DE EJECUCIÓN Y DE ANÁLISIS	59
6.5. TRABAJOS DE LABORATORIO	59
6.5.1. Pruebas de mezclas elaboradas en el laboratorio.....	59
6.5.2. Pruebas de muestras inalteradas, de campo.	61
6.6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	62
CAPÍTULO 7	65
7. PRUEBAS DE RESISTENCIA DE COMPRESIÓN SIMPLE (UCS) Y DE COMPRESIÓN TRIAXIAL TIPO UU	65
7.1. NORMATIVIDAD	65
7.2. GENERALIDADES	65
7.2.1. Compresión simple	66
7.2.2. Pruebas triaxiales	67
7.2.3. Módulo de elasticidad.....	68
7.3. DEFINICIONES	69
7.4. CONSIDERACIONES DE EJECUCIÓN Y DE ANÁLISIS	70
7.5. TRABAJOS DE LABORATORIO	71
7.5.1. Prueba de compresión simple (UCS).....	71
7.5.1.1. Pruebas sobre especímenes elaborados en el laboratorio.	71
7.5.1.2. Pruebas sobre especímenes inalterados, Plataforma 1 (ANFACAL).	76
7.5.2. Pruebas triaxiales tipo UU.....	77
7.6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	80
CONCLUSIONES	87
RECOMENDACIONES	87
REFERENCIAS	88

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1. Proyecto NAICM.....	5
Figura 1.2. Afectaciones constructivas en el NAICM	6
Figura 1.3. Localización de los PCA.....	8
Figura 2.1. Óxido de calcio empleado en la investigación	16
Figura 3.1. Diferentes estados del suelo (Das, B., 1999).....	18
Figura 3.2. Carta de plasticidad para clasificación de los suelos de partículas finas en laboratorio, (Das, B., 2012)	19
Figura 3.3. Variación del w_p y la ec. 3.1	22
Figura 3.4. Variación del IP y la ec. 3.2.....	22
Figura 3.5. Variación del w_L y el tiempo de fraguado	23
Figura 3.6. Variación del w_p y el tiempo de fraguado	23
Figura 3.7. Variación del IP y el tiempo de fraguado	24
Figura 3.8. Variación del w_L y el % de CaO.....	25
Figura 3.9. Variación del w_p y el % de CaO.....	25
Figura 3.10. Variación del IP y el % de CaO.....	26
Figura 3.11. Variación Gs y el % de CaO.....	26
Figura 3.12. Carta de plasticidad y comportamiento de mezclas de suelo con CaO.....	27
Figura 3.13. Comparación de límites de Atterberg para diferentes periodos de fraguado 1, 48 y 10,080 h (420 días), mezcla de suelo S-1 con 10% de CaO	29
Figura 4.1. Curvas de compactación Proctor estándar y modificada para un limo arcilloso (método A), (Das, B., 2012).	34
Figura 4.2. Curvas de compactación con diferentes energías. (Flores y Romo, 2003).....	35
Figura 4.3. Molde miniatura con extensión y pisón, (Flores y Romo, 2003)	36
Figura 4.4. Material mezclado con CaO	36
Figura 4.5. Variación del w (%) con el CaO adicionado (%)	37
Figura 4.6. Curvas de compactación para porcentajes variables de CaO, “Curva por deshidratación química”	38
Figura 4.7. Curva de compactación, muestra S-1 y 10% de CaO	40
Figura 4.8. Curva de compactación, muestra S-1 y 15% de CaO	40
Figura 4.9. Curva de compactación, muestra S-1 y 20% de CaO	41
Figura 4.10. Curva de compactación, muestra M-1 y 10% de CaO.....	42
Figura 4.11. Curva de compactación, muestra M-1 y 15% de CaO.....	42
Figura 4.12. Curva de compactación, muestra M-1 y 20% de CaO.....	43
Figura 4.13. Curva de compactación, muestra M-2 y 5% de CaO.....	44
Figura 4.14. Curva de compactación, muestra M-2 y 10% de CaO	44
Figura 5.1. Determinación del consumo inicial de cal, [20]	48
Figura 5.2. Curva del pH de las soluciones del hidróxido de calcio a 25 °C, [21]	49
Figura 5.3. Ensayo Eades & Grim, muestra S-1	53
Figura 5.4. Ensayo Eades & Grim, muestra M-1	53

Figura 5.5. Ensayo Eades & Grim, muestra M-2	53
Figura 6.1. Curva γ_d vs CBR, muestra S-1 con 15% de CaO.....	60
Figura 6.2. Curva γ_d vs CBR, muestra M-1 con 15% de CaO	60
Figura 6.3. Curva γ_d vs CBR, muestra M-2 con 5% de CaO	61
Figura 6.4. CBR de la muestra de suelo natural y las estabilizadas con CaO.....	63
Figura 6.5. CBR de las muestras estabilizadas inalteradas (condición in-situ).....	63
Figura 6.6. CBR de las muestras estabilizadas inalteradas (condición sumergida)	64
Figura 7.1. Curvas típicas de ensayos de compresión simple	66
Figura 7.2. Envoltente de resistencia típica de una prueba triaxial tipo UU.....	67
Figura 7.3. Envoltente de resistencia para suelos no saturados en prueba triaxial tipo UU.....	68
Figura 7.4. Curva esfuerzo – deformación, E_{50}	69
Figura 7.5. Curva esfuerzo – deformación, resultados UCS en mezcla S-1 con 15% de CaO.....	72
Figura 7.6. Círculo de Mohr, resultados UCS en mezcla S-1 con 15% de CaO.....	73
Figura 7.7. Curva esfuerzo – deformación, resultados UCS en mezcla M-1 con 15% de CaO.....	74
Figura 7.8. Círculo de Mohr, resultados UCS en mezcla M-1 con 15% de CaO.....	74
Figura 7.9. Curva esfuerzo – deformación, resultados UCS en mezcla M-2 con 5% de CaO.....	75
Figura 7.10. Círculo de Mohr, resultados UCS en mezcla M-2 con 5% de CaO.....	76
Figura 7.11. Curva esfuerzo – deformación, resultados UCS en mezcla P-1 con 10% de CaO.....	77
Figura 7.12. Círculo de Mohr, resultados UCS en mezcla P-1 con 10% de CaO.....	77
Figura 7.13. Círculo de Mohr, resultados UCS en mezcla S-1 con 15% de CaO.....	78
Figura 7.14. Círculo de Mohr, resultados UCS en mezcla M-1 con 15% de CaO.....	79
Figura 7.15. Círculo de Mohr, resultados UCS en mezcla M-2 con 5% de CaO.....	80
Figura 7.16. c_u vs tiempo de curado en prueba UCS, mezcla S-1 con 15% de CaO.....	81
Figura 7.17. E_{50} vs tiempo de curado en prueba UCS, mezcla S-1 con 15% de CaO.....	81
Figura 7.18. c_u vs tiempo de curado en prueba UCS, mezcla M-1 con 15% de CaO	82
Figura 7.19. E_{50} vs tiempo de curado en prueba UCS, mezcla M-1 con 15% de CaO	82
Figura 7.20. c_u vs tiempo de curado en prueba UCS, mezcla M-2 con 5% de CaO	83
Figura 7.21. E_{50} vs tiempo de curado en prueba UCS, mezcla M-2 con 5% de CaO	83
Figura 7.22. Resumen de resultados UCS. Círculo de Mohr, mezcla P-1 con 10% de CaO y mezcla S-1 con 15% de CaO	84
Figura 7.23. Variación del esfuerzo desviador máximo (q_u) y el contenido de agua (w) en el ensaye UCS	85
Figura 7.24. Variación del esfuerzo desviador máximo (q_u) y la deformación unitaria (ϵ) en el ensaye UCS.....	85

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
<i>Tabla 1.1. Coordenadas geográficas de los PCA.....</i>	7
<i>Tabla 2.1. Diferencias entre cal viva y cal hidratada.....</i>	11
<i>Tabla 2.2. Diseño y evaluación de suelos estabilizados con cal</i>	14
<i>Tabla 3.1. Características iniciales de las muestras</i>	21
<i>Tabla 3.2. Muestra S-1, variación de IP y w_p.....</i>	21
<i>Tabla 3.3. Muestra S-1, mezcla de suelo-CaO para 1 y 48 h.....</i>	23
<i>Tabla 3.4. Muestra S-1, mezcla de suelo-CaO.....</i>	24
<i>Tabla 3.5. Muestra M-1, mezcla de suelo-CaO</i>	24
<i>Tabla 3.6. Muestra M-2, mezcla de suelo-CaO</i>	24
<i>Tabla 3.7. Densidad de sólidos, G_s.....</i>	26
<i>Tabla 3.8. Muestra P-1 y P-2, plataformas de prueba (ANFACAL)</i>	27
<i>Tabla 4.1. Método de compactación de acuerdo al tipo de suelo.....</i>	32
<i>Tabla 4.2. Óxido de calcio (%) vs w (%)</i>	37
<i>Tabla 4.3. Parámetros de compactación “Curva por deshidratación química”</i>	38
<i>Tabla 4.4. Parámetros de compactación muestra S-1 con 10% de CaO.....</i>	39
<i>Tabla 4.5. Parámetros de compactación muestra S-1 con 15% de CaO.....</i>	40
<i>Tabla 4.6. Parámetros de compactación muestra S-1 con 20% de CaO.....</i>	41
<i>Tabla 4.7. Parámetros de compactación muestra M-1 con 10% de CaO</i>	41
<i>Tabla 4.8. Parámetros de compactación muestra M-1 con 15% de CaO</i>	42
<i>Tabla 4.9. Parámetros de compactación muestra M-1 con 20% de CaO</i>	43
<i>Tabla 4.10. Parámetros de compactación muestra M-2 con 5% de CaO</i>	43
<i>Tabla 4.11. Parámetros de compactación muestra M-2 con 10% de CaO</i>	44
<i>Tabla 4.12. Porcentajes de CaO óptimos recomendados</i>	45
<i>Tabla 5.1. Temperatura vs pH de una solución saturada de hidróxido de calcio</i>	48
<i>Tabla 5.2. Solubilidad de hidróxido de calcio en agua</i>	49
<i>Tabla 5.3. La Escala de pH.....</i>	51
<i>Tabla 5.4. Resultados del análisis cuantitativo por FRX.....</i>	54
<i>Tabla 5.5. Resultados del análisis cuantitativo por DRX.....</i>	55
<i>Tabla 5.6. Corrección de pH por temperatura</i>	56
<i>Tabla 5.7. Porcentajes de CaO empleados en la investigación.....</i>	56
<i>Tabla 6.1. Clasificación de materiales de acuerdo con su CBR, NMX-C-416.....</i>	58
<i>Tabla 6.2. Clasificación de materiales de acuerdo con su CBR, SCT.....</i>	58
<i>Tabla 6.3. Prueba CBR, muestra S-1 con 15% de CaO.....</i>	60
<i>Tabla 6.4. Prueba CBR, muestra M-1 con 15% de CaO</i>	60
<i>Tabla 6.5. Prueba CBR, muestra M-2 con 5% de CaO</i>	61
<i>Tabla 6.6. Prueba CBR, muestra P-1 con 10% de CaO</i>	62
<i>Tabla 6.7. Prueba CBR, muestra P-2 con 10% de CaO</i>	62

<i>Tabla 7.1 Resumen de resultados de prueba UCS, muestra en estado natural, sin CaO</i>	72
<i>Tabla 7.2 Resumen de resultados de prueba UCS, muestra S-1 con 15% de CaO</i>	72
<i>Tabla 7.3 Resumen de resultados de prueba UCS, muestra M-1 con 15% de CaO</i>	73
<i>Tabla 7.4 Resumen de resultados de prueba UCS, muestra M-2 con 5% de CaO</i>	75
<i>Tabla 7.5 Resumen de resultados de prueba UCS, muestra P-1 con 10% de CaO</i>	76
<i>Tabla 7.6 Resumen de resultados de prueba UU, muestra S-1 con 15% de CaO</i>	78
<i>Tabla 7.7 Resumen de resultados de prueba UU, muestra M-1 con 15% de CaO</i>	79
<i>Tabla 7.8 Resumen de resultados de prueba UU, muestra M-2 con 5% de CaO</i>	79
<i>Tabla 7.9 Evolución de parámetros de resistencia con el tiempo de curado en prueba UCS, mezcla S-1 con 15% de CaO</i>	81
<i>Tabla 7.10 Evolución de parámetros de resistencia con el tiempo de curado en prueba UCS, mezcla M-1 con 15% de CaO</i>	82
<i>Tabla 7.11 Evolución de parámetros de resistencia con el tiempo de curado en prueba UCS, muestra M-2 con 5% de CaO</i>	83
<i>Tabla 7.12 Pesos volumétricos máximos de materiales en terracerías</i>	86

INTRODUCCIÓN

PLANTEAMIENTO Y ALCANCES DE LA TESIS

La necesidad de construir la infraestructura civil del proyecto del nuevo aeropuerto internacional de la Ciudad de México (NAICM) sugiere enfrentar diversos retos de ingeniería que requieren atención para lograr el éxito. El NAICM está ubicado dentro de los terrenos del Ex Lago de Texcoco en donde el subsuelo es predominantemente arcilloso, de baja resistencia y alta compresibilidad. Desde el punto de vista geotécnico, las condiciones del subsuelo son difíciles para los diversos procedimientos constructivos, motivo principal de elaboración de esta investigación.

En la literatura existen diversos métodos confiables para modificar las propiedades de las arcillas a nivel superficial o profundo, por mencionar algunos, la densificación, la sustitución, el refuerzo, la precarga y la estabilización química. Esta última, considerada como el objetivo general de la presente investigación, “Estabilización de los suelos superficiales del NAICM con Óxido de Calcio (CaO)”.

Entre otras cualidades, los materiales arcillosos estabilizados con CaO incrementan su resistencia y disminuyen los cambios volumétricos en comparación con suelos en estado natural. Con estas modificaciones se pretende crear una superficie competente, capaz de soportar cargas de diversa índole durante las maniobras de construcción. La estabilización con CaO modifica los suelos químicamente y los transforma en materiales utilizables, mejorando sus propiedades y sus características fisicoquímicas.

En los capítulos que conforman esta investigación se estudian los efectos de la estabilización química de los suelos arcillosos mediante la adición de óxido de calcio (CaO) conocido también como “cal viva”. El comportamiento de las mezclas se evalúa a corto y mediano plazo para diferentes edades de fraguado, de acuerdo con su desempeño en campo.

La investigación se fundamenta en distintas pruebas experimentales de laboratorio, pruebas químicas y físicas, las cuales permiten caracterizar, evaluar y determinar la cantidad necesaria de CaO para estabilizar los materiales arcillosos, además de pruebas de densificación y de resistencia.

La investigación inicia con los trabajos de campo para la recolección de muestras y su caracterización, seguido de la determinación del porcentaje óptimo de CaO necesario para lograr la estabilización, considerando para ello, las condiciones físicas del sitio, los procesos de mezclado y los tiempos de ejecución en campo durante la aplicación de esta solución.

Los materiales analizados consisten en el muestreo de tres Pozos a Cielo Abierto (PCA) de 0.50 m de profundidad en promedio, localizados estratégicamente dentro del polígono del NAICM con distintos contenidos de agua. Adicionalmente se tomaron muestras alteradas e inalteradas de dos plataformas de prueba construidas en el sitio (NAICM) por la Asociación Nacional de Fabricantes de Cal, A. C. (ANFACAL) con el objetivo de estudiar su desempeño en condiciones naturales a corto y largo plazo. La construcción de las plataformas de prueba se realizó con la adición en peso de 10% de CaO.

OBJETIVOS GENERALES

1. Estabilización de arcillas en el predio del NAICM.
2. Evaluación del comportamiento geotécnico de las mezclas estabilizadas a corto y mediano plazo.
3. Identificación de las áreas de aplicación y usos de los parámetros obtenidos.

OBJETIVOS PARTICULARES

1. Determinación del porcentaje de CaO necesario para lograr la estabilización de tres muestras de suelo.
2. Analizar la evolución de las mezclas estabilizadas en el tiempo, en términos de resistencia y expansión.

ESTRUCTURA Y CAPÍTULOS

El resumen conceptual de cada uno de los capítulos que se tratan en la tesis se lista a continuación:

CAPÍTULO 1. NAICM. Se presenta la descripción conceptual del proyecto del nuevo aeropuerto internacional de la Ciudad de México. Las condiciones del subsuelo del Ex Lago de Texcoco, el planteamiento de la problemática en los procesos constructivos, la propuesta de solución y los trabajos de campo realizados para el estudio de los materiales del sitio.

CAPÍTULO 2. ÓXIDO DE CALCIO (CaO). Se presenta una pequeña descripción del empleo de la cal en la historia de la humanidad y su proceso de producción. Se describen las características del CaO y sus aplicaciones en la geotecnia, en específico, a su empleo en la estabilización de materiales arcillosos y las reacciones químicas que se producen. Se presentan las características del CaO empleadas en la investigación.

CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DE SUELOS. Se presenta la descripción geotécnica y la metodología utilizada para determinar las propiedades índice de las muestras de suelo analizadas en la investigación, tanto para condiciones naturales como para las mezclas de suelo-CaO elaboradas con distintos porcentajes de CaO en peso respecto al suelo en estado natural (muestra integral), 5, 10, 15, 20 y 25%. Se analizan los efectos producidos por el CaO sobre los índices de Atterberg de la muestra de suelo S-1 ($w = 170\%$) para dos tiempos de fraguado distintos, de 1 y 48 h, respectivamente, medidos a partir del inicio de la mezcla suelo-CaO. Se describen y verifican las consideraciones empleadas en la ejecución de la investigación.

CAPÍTULO 4. COMPACTACIÓN DE SUELOS. En este capítulo se hace mención al objetivo general de la compactación y a los efectos que la misma induce a los suelos. Se describen las consideraciones y la metodología empleada para determinar las curvas de compactación. Se presentan los resultados y la relación entre las curvas de compactación generadas, tanto para las mezclas de suelo-CaO con variación del porcentaje de CaO adicionado, 5, 10, 15, 20 y 25% o “Curvas por deshidratación química”, como para las mezclas con porcentaje de CaO constante o “Curvas por deshidratación química y secado a temperatura ambiente”.

CAPÍTULO 5. PRUEBA QUÍMICA EADES & GRIM Y RX. Se presenta la descripción general, el objetivo y la metodología empleada para determinar el porcentaje de CaO necesario para estabilizar químicamente las muestras de suelo analizadas, con base en la prueba de laboratorio Eades & Grim y el empleo de agua del sitio. Definido el porcentaje necesario de CaO se compara con los resultados obtenidos en el “CAPÍTULO 4” y se concluye su aplicabilidad como solución a la problemática del NAICM.

Adicionalmente como complemento al capítulo, se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de análisis químico por Fluorescencia de Rayos X de elementos mayores (FRX) y los resultados del análisis por Difracción de Rayos X (DRX), con los cuales se determinó el tipo de minerales de las arcillas analizadas en la investigación.

CAPÍTULO 6. PRUEBA DE RESISTENCIA TIPO CBR Y DE EXPANSIÓN. Se presenta la descripción general, el objetivo y la metodología empleada para determinar la resistencia de las mezclas de suelo-CaO mediante la prueba de laboratorio denominada California Bearing Ratio (CBR) y el comportamiento ante cambios volumétricos por expansión (Exp) inducidos por la sumersión en agua de los especímenes. La ejecución de la prueba se realiza bajo dos condiciones de trabajo, para especímenes elaborados en laboratorio y para especímenes inalterados obtenidos de las plataformas de prueba (en sitio).

CAPÍTULO 7. PRUEBAS DE RESISTENCIA DE COMPRESIÓN SIMPLE (UCS) Y DE COMPRESIÓN TRIAXIAL TIPO UU. Se presenta la descripción general, el objetivo y la metodología empleada para determinar la resistencia de las mezclas de suelo-CaO mediante las pruebas de compresión simple (UCS) y mediante la prueba triaxial no drenada no consolidada (UU). Se evalúa la evolución de la resistencia de los especímenes con el tiempo de curado (7, 14, 21, 69 días y una condición particular con 25 días de curado y 37 días sometida a secado por temperatura ambiente). La ejecución de la prueba tipo UCS se realiza para dos condiciones de trabajo, para especímenes elaborados en laboratorio y para especímenes inalterados obtenidos de las plataformas de prueba construidas por la ANFACAL (en sitio).

ESTADO DEL ARTE

A partir de 1950 en países como Estados Unidos, Gran Bretaña, Francia, Australia y Alemania principalmente, se han establecido extensos programas de investigación sobre el tratamiento de suelos arcillosos con cal, con el fin de aprovecharlos para la construcción de infraestructura ferroviaria y aeroportuaria.

De acuerdo con las investigaciones en España (ANCADE, 2008) la acción de la cal sobre los terrenos depende de la naturaleza de éste y del tipo de cal que se utilice, en suelos húmedos la adición de cal viva produce una reducción de la humedad existente por el consumo de agua de la cal para hidratarse, así como por la evaporación producida por el calor desprendido. Con 1% de cal viva añadida, se puede disminuir el contenido de agua del suelo entre un 3 y un 5%. Por otro lado, la adición de cal hidratada sólo produce una disminución del agua debido a su humectación, lo que representa que para cada 1% de cal hidratada añadida se reduzca sólo en un 0,3% la humedad del terreno. La modificación de suelos finos arcillosos se puede considerar como la primera fase de la reacción de la cal con el suelo para aumentar su trabajabilidad y uso, se puede lograr mediante pequeñas cantidades de cal viva o hidratada, entre el 1 y el 3% del peso en seco del suelo.

La experiencia ha demostrado que la cal puede reaccionar con suelos de granulometrías medias y finas que tengan un contenido de arcilla mínimo del 7% y un índice de plasticidad mínimo de 10. Como guía general para la estabilización, el profesor Little y otros especialistas proponen que la estabilización con cal puede ser considerada para suelos que tengan un índice de plasticidad mayor de 10 y un porcentaje del mismo que pase por el tamiz de 80 micras superior al 25%. (Little, 2004).

En México uno de los métodos más empleados en el ámbito de las Vías Terrestres es la estabilización química con hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) o cemento Portland, empleado para modificar las propiedades de los materiales con altos porcentajes de materiales finos, favoreciendo la disminución de la humedad del suelo y permitiendo su trabajabilidad, convirtiéndolo en un material desmenuzable, logrando así que el material sea acondicionado para su empleo en la estructura de pavimento.

Algunos estudios concluyentes que se han realizado por distintos autores, principalmente en el sector de las vías terrestres, mencionan que la estabilización de suelos con óxido de calcio (CaO) genera una reacción puzolánica, creando de forma permanente un nuevo material duradero, resistente al agrietamiento e impermeable [40]. La adición de cal entre 3 a 6% es el rango habitual para la estabilización de los suelos en dichas investigaciones para lograr una capa estructural resistente y flexible [10], [20], [40], [41]; sin embargo, las características y condiciones de los suelos investigados hasta el momento no coinciden con los materiales característicos del NAICM.

CAPÍTULO 1

EL NUEVO AEROPUERTO INTERNACIONAL DE LA CIUDAD DE MÉXICO (NAICM)

1. EL NAICM

Para dar solución a las necesidades aeroportuarias del país y fomentar el crecimiento económico, el Gobierno Federal está construyendo el nuevo aeropuerto internacional de la Ciudad de México (NAICM, Figura 1.1), que convertirá la Zona Oriente del Valle de México en un nuevo polo de desarrollo, [1].

El polígono del NAICM estará localizado dentro en un terreno de aproximadamente 4,430 ha, ubicado en el Ex Lago de Texcoco. Se ubica aproximadamente a 14 km al noreste del aeropuerto internacional de la Ciudad de México (AICM) y se encuentra limitado al norte con el depósito de evaporación solar “El Caracol”, al sur por la carretera Peñón Texcoco, al este por tierras salitrosas y algunas de cultivo y al oeste por el Circuito Exterior Mexiquense (Dren General del Valle).



Figura 1.1. Proyecto NAICM

Fotografía del proyecto de los arquitectos Norman Foster y Fernando Romero.

1.1. EL SUBSUELO DEL EX LAGO DE TEXCOCO

La información geotécnica que se conoce de la zona del Ex Lago de Texcoco ha sido investigada y publicada en artículos y tesis por diversos autores; por lo cual se hace mención a continuación de los resultados de dichos estudios. Al igual que las formaciones típicas de la Ciudad de México, en el lugar se

identifican las formaciones: capa superficial (CS), formación arcillosa superior (FAS), capa dura (CD), formación arcillosa inferior (FAI) y depósitos profundos (DP), con variaciones importantes debidas a la génesis del sitio.

La investigación se enfoca exclusivamente en la CS y la FAS, esta última considerada debido a la inexistencia de la CS en algunas zonas dentro del polígono del NAICM, como reflejo de la génesis lacustre del sitio. La CS tiene variaciones en su espesor que van desde los 0.5 m hasta los 3.0 m. Esta capa la conforman suelos arcillosos y limosos, sometidos a procesos estacionales de secado y saturación. Se tiene conocimiento que, en algunas zonas, sobre esta capa se encuentran materiales provenientes del desazolve de algunas presas cercanas y posiblemente también escombros de demolición de los sismos de 1985 en la zona poniente, y en el sur y poniente varios metros de basura en proceso de degradación [2]; por otro lado, la FAS la conforman materiales compresibles a muy compresibles con espesores importantes, los cuales disminuyen hacia el este y norte. Esta ha sido estratificada por los acarreo de los ríos del oriente y por los aluviones de las descargas del norte al sur de los antiguos lagos de Zumpago y Xaltocan.

En las formaciones descritas predominan los suelos arcillosos de alta compresibilidad con variaciones de contenidos de agua que pueden ir en promedio de 50% para la CS y superiores a 50% y hasta 400% para la FAS. De acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS, los materiales son de tipo CH, con índice de plasticidad (IP) y límite líquido (w_L) muy altos, con mínima resistencia y muy susceptibles a cambios volumétricos importantes.

1.2. PROBLEMÁTICA

Las condiciones naturales del subsuelo sumado a los cambios estacionales que ocurren en el sitio generan afectaciones importantes de índole constructivo principalmente, incrementando los tiempos de traslado interno, retraso de los tiempos de maniobra, además de daños a los equipos de construcción, inestabilidad de cortes por excavaciones y costos por retiro y disposición final del material excavado (considerado hasta el momento como material no apto para su empleo en la construcción), “Figura 1.2”.

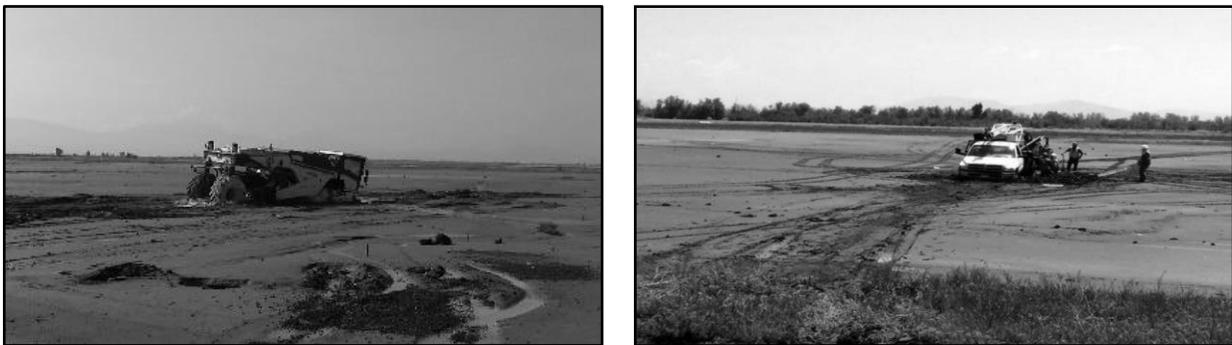


Figura 1.2. Afectaciones constructivas en el NAICM

Fotografías de ANFACAL [3].

1.3. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Expuestas las condiciones de los materiales del subsuelo y sus implicaciones en los distintos procesos constructivos, se plantea entonces, el empleo del óxido de calcio (CaO) como medio de solución confiable para estabilizar las arcillas del lugar. Desde el punto de vista geotécnico resulta ser una solución de bajo

costo, de efectos inmediatos y duraderos. El trabajo que se desarrolla en cada uno de los capítulos siguientes permitirá conocer la dosificación necesaria para estabilizar materiales arcillosos con distintos contenidos de humedad, además de observar y conocer su comportamiento geotécnico a corto y mediano plazo.

El efecto esperado de la estabilización con CaO consiste en lograr plataformas y superficies de rodamiento suficientemente competentes para atender las solicitudes constructivas y posiblemente permanentes de la infraestructura aeroportuaria, como: pistas, calles de rodaje, plataformas, terminales, hangares, vialidades, etc.

1.4. TRABAJOS DE CAMPO

Los trabajos de campo consistieron en una serie de campañas de exploración superficial, mediante la ejecución de Pozos a Cielo Abierto (PCA) a una profundidad promedio de 0.50 m con recuperación de muestras de tipo alterado e inalterado, en el terreno natural y en las plataformas de prueba estabilizadas con CaO, construidas previamente.

Para definir la ubicación de los PCA, se consideró necesario definir zonas representativas que cubrirían los objetivos de la investigación, como se describe en los puntos listados a continuación:

- Tres materiales con distinto contenido de agua.
- Zonas no alteradas por los procesos constructivos que se realizan por la construcción de las pistas de rodaje, caminos de acceso y campamentos.
- Conocimiento previo de la ubicación de plataformas de prueba estabilizadas con CaO.
- La profundidad máxima que se logra en la estabilización superficial (0.50 m) de suelos con medios mecánicos, como lo son los equipos de construcción convencionales y en específico la estabilizadora.

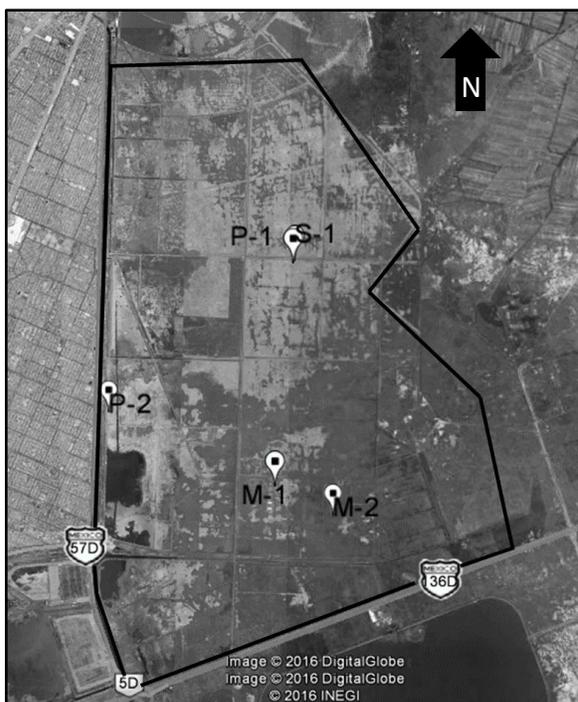
Establecidos los puntos anteriores, se dio inicio a las campañas de exploración, comenzando con la ejecución de tres PCA excavados a una profundidad de 0.50 m en terreno natural con recuperación de muestras alteradas, seguido de su correspondiente caracterización dentro del laboratorio.

Posteriormente se realizaron las campañas de exploración sobre las plataformas estabilizadas con CaO, con recuperación de muestras inalteradas, mediante la extracción de corazones y muestras cúbicas del material estabilizado.

En la “Figura 1.3” se presenta la localización de los PCA y la localización de las zonas en donde se han construido plataformas de prueba estabilizadas con CaO.

Tabla 1.1. Coordenadas geográficas de los PCA

PCA	Latitud	Longitud
P-1	19° 31.596'N	98° 59.179'O
P-2	19° 30.360'N	99° 0.768'O
S-1	19° 31.618'N	98° 59.164'O
M-1	19° 29.771'N	98° 59.321'O
M-2	19° 29.533'N	98° 58.817'O



Simbología

- P-1** Lugar. Plataforma 1.
Plataforma de prueba estabilizada con 10% de CaO.
Maquinaria: retroexcavadora.
Fecha de construcción: julio 2015.
- P-2** Lugar. Plataforma 2.
Plataforma de prueba estabilizada con 10% de CaO.
Maquinaria: estabilizadora.
Fecha de construcción: abril 2016.
- S-1** Lugar. Colindancia Suroeste.
"Plataforma 1".
- M-1** Lugar. Plataformas de prueba (Pistas de rodaje).
"CFE-II".
- M-2** Lugar. Campamento de grupo aeroportuario.
"Grupo de Oro".

Figura 1.3. Localización de los PCA

Abiertos los pozos de exploración fue posible distinguir la estratigrafía superficial de cada sitio y hacer el muestreo necesario. Las muestras alteradas e inalteradas se protegieron contra la pérdida de humedad, las primeras utilizando bolsas de plástico y plástico adherible y las segundas, utilizando manta de cielo y parafina líquida. Posteriormente, las muestras fueron etiquetadas y trasladadas a laboratorio para la determinación de su contenido de agua inicial y su resguardo dentro del cuarto húmedo.

De cada uno de los sondeos superficiales excavados se levantó un registro de campo, el cual contiene la denominación del pozo, su ubicación, número, profundidad de las muestras y el espesor de los estratos encontrados.

CAPÍTULO 2

LA CAL

2. LA CAL

El objetivo de este capítulo es presentar una breve descripción del empleo de la cal en la historia de la humanidad, su proceso de producción, además de presentar de forma general las características y propiedades del óxido de calcio (CaO) utilizado en la investigación y sus aplicaciones en la geotecnia, en específico, a la estabilización de materiales arcillosos.

2.1. EMPLEO DE LA CAL EN LA HISTORIA DE LA HUMANIDAD

Los usos de la cal a través de la historia han contribuido significativamente al desarrollo de la humanidad, no solo en el ámbito de la construcción, sino también en otras áreas como la Química, Medicina, Agricultura, las Artes Plásticas y la Pintura, por mencionar algunas. No se sabe con exactitud desde cuando se descubrió la cal, pero se han hallado yacimientos arqueológicos neolíticos que datan desde el año 7000 A.C donde se usaba la cal para crear pavimentos con superficies pulidas. Ese hecho llevo a pensar que desde el neolítico se conocía bien el uso de la cal desde su extracción, calcinación y amasado. El buen estado de conservación de estos morteros de cal supone gran calidad en sus procesos que se pueden verificar, por ejemplo: en la civilización mesopotámica y la egipcia, los yacimientos de Yafrah al Sur de Galilea, la Pirámide de Guiza construida con piedra caliza por los egipcios o el caso de la Muralla China en la que los chinos lograron estabilizar el suelo con cal.

En Grecia, los morteros de cal fueron utilizados para la construcción de viviendas, sin embargo, los morteros griegos mostraban la adición de otras sustancias químicas para modificar su dureza y ductilidad. Los romanos adoptaron sus técnicas de fabricación y desarrollaron en mayor medida distintos usos de la cal, como la práctica de añadir espuma de lava volcánica (tezontle) a las mezclas, lo que aligeraba los morteros. Los morteros romanos deben su alta calidad al cuidado con el que eran escogidos sus componentes, a las condiciones de cocción de la piedra, así como a la homogeneidad y correcta proporción de las mezclas. Estos factores, hacían de los morteros romanos el mejor exponente del empleo de la cal.

Durante toda la historia de la humanidad se han manifestado construcciones hechas a base de mezclas de cal y durante el paso del tiempo sólo ha cambiado la mezcla de ésta con otros componentes y por citar algunos ejemplos, en la época Neolítica la cal se mezclaba con impurezas, en la Mesopotámica se mezclaba con arcilla, arena y piedras, en la Romana con áridos, puzolanas y aditivos, en el México antiguo con arena y baba de nopal o savia de maguey y en la época moderna la mezcla se puede realizar con áridos, puzolanas, escorias y aditivos.

2.2. GENERALIDADES Y DEFINICIÓN DE CAL

La materia prima para la elaboración de los diferentes tipos de cal es la piedra caliza, material extraído de depósitos sedimentarios, la cual es sometida a un proceso de descomposición térmica de materiales a grandes temperaturas. La caliza abunda en la naturaleza y dependiendo de la región en que sea explotada

puede variar en su composición química, de tal manera que para calificar que una piedra caliza pueda ser procesada, debe contener como mínimo un 50% de carbonato de calcio. Principalmente, las piedras calizas contienen minerales como CaCO_3 , MgCO_3 , CaO , Hierro, Sílice, Alúmina y rastros de otros componentes o impurezas que afectan la calidad del CaO , [5].

Durante el proceso de descomposición térmica o de calcinación a temperaturas entre 880 y 1000 °C, se liberan moléculas de dióxido de carbono (CO_2), resultando el material llamado óxido de calcio (CaO), de color blanco y muy cáustico. Este último proceso puede ser reversible si al enfriarse la cal se permite la absorción del CO_2 del aire nuevamente y después de cierto tiempo, vuelve a convertirse en CaCO_3 o carbonato de calcio.

El óxido de calcio (CaO) también conocido como “cal viva”, al combinarse con agua produce una reacción exotérmica violenta y se convierte entonces, en el hidróxido de calcio que se comercializa como cal en forma de polvo blanco, conocido también, como cal muerta o apagada.

El CaO generalmente está compuesto por minerales como: carbonato de calcio, carbonato de magnesio, Sílice, Alúmina, Hierro, Azufre y algunos otros minerales. El carbonato de calcio y el carbonato de magnesio constituyen del 80 al 90% del total de la composición de la piedra caliza, consecuentemente, de acuerdo con la abundancia de estos minerales en la piedra caliza se pueden producir dos tipos de cal, la cal cálcica y la cal magnésica. Ambas difieren entre sí por el producto final, después del proceso de calcinación; es decir, la piedra caliza cálcica con alto contenido de calcio tiene un 90 a 95% de CaO y 1 a 2% de MgO , y la piedra caliza Magnésica (también conocida como dolomítica) tiene un 60 a 65% de CaO y un 35 a 40% de MgO , [5].

2.3. PROCESO DE ELABORACIÓN DE LA CAL

- **Selección y extracción.** Comprende todos los estudios geológico mineros y geoquímicos de las áreas por explotar, además de los procesos que se realizan en la cantera a partir de los cuales se obtiene la piedra caliza.
- **Trituración.** Los fragmentos de roca se reducen de tamaño y se tamizan. Los fragmentos con diámetro requerido son transportados hacia los hornos de calcinación.
- **Calcinación.** Consiste en la calcinación de los fragmentos de roca seleccionados (de mayor tamaño). En este proceso se pierde cerca de la mitad de peso por la descarbonatación o pérdida del dióxido de carbono de la caliza original. Es la parte del proceso en que la piedra caliza (CaCO_3) se “convierte” en CaO .
- **Enfriamiento.** Proceso necesario para que la cal pueda ser manejada. Momento en el que los gases calientes regresan al horno como aire secundario para recircular energía calorífica.
- **Inspección.** El proceso siguiente es la inspección cuidadosa de muestras para evitar núcleos o piezas de roca sin calcinar.
- **Cribado.** Separación de la cal viva en trozo y de los segmentos de la porción que pasará por un proceso de trituración y pulverización.
- **Trituración y pulverización.** Reducción del tamaño del material para la obtención de la cal viva molida y pulverizada. Posteriormente será separada de la porción que será enviada al proceso de hidratación.

- **Hidratación y separación.** Consiste en agregar agua a la cal viva. Al hidratarse las piedras de cal viva se convierten en cal hidratada o cal apagada (las diferencias entre la cal viva y la cal hidratada se presentan en la “Tabla 2.1”). Consecutivamente se traslada a un separador de residuos, donde se separa de la cal ya hidratada de los óxidos no hidratados y algunos carbonatos conocidos como “granaza”. Únicamente la cal viva pasa por un hidratador a presión y posteriormente a molienda para obtener cal siderúrgica hidratada a presión.

Tabla 2.1. Diferencias entre cal viva y cal hidratada

CaO - Cal viva	Ca (OH) ₂ - Cal hidratada
<p>Apariencia</p> <ul style="list-style-type: none"> • Trozos (3/4" - 2 1/2") • Polvo (material pulverizado) 	<p>Apariencia</p> <ul style="list-style-type: none"> • Polvo (pasa malla 100)
<p>Características generales</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reacción exotérmica cuando se combina con agua • Absorbe agua del ambiente (se hidrata) • Soluciones alcalinas • Densidad 900 – 1200 kg/m³ 	<p>Características generales</p> <ul style="list-style-type: none"> • No reacciona con el agua • Absorbe CO₂ del ambiente (carbonatación) • Soluciones alcalinas • Densidad 450 – 640 kg/m³
<p>Almacenamiento</p> <ul style="list-style-type: none"> • Recipiente hermético con tiempo limitado corto (semanas/días) • Saco de plástico • Lejos de fuentes de agua/papel o tela (por la generación de calor) 	<p>Almacenamiento</p> <ul style="list-style-type: none"> • Recipiente hermético con tiempo limitado corto (semanas/días) • Saco de papel kraft
<p>Manejo</p> <ul style="list-style-type: none"> • Resequedad de la piel en contacto directo y prolongado • Nocivo en contacto con mucosas 	<p>Manejo</p> <ul style="list-style-type: none"> • Resequedad de la piel en contacto directo y prolongado • Nocivo en contacto con mucosas

Foro de Construcción con Cal [6]. / www.foccal.org

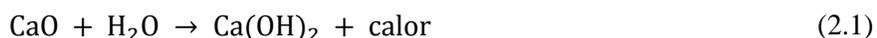
- **Envase y embarque.** La cal es llevada a una tolva de envase e introducida en sacos para su disposición final de transporte.

2.4. QUÍMICA DE LA CAL Y SUS EFECTOS PUZOLÁNICOS

En general y en condiciones naturales la superficie de las arcillas está formada por láminas alargadas, estructuradas por arreglos tetraédricos y octaédricos de átomos de silicio y aluminio, ligadas entre ellas por la carga superficial de las mismas, por enlaces de hidrogeno o cationes. La superficie de las arcillas se encuentra cargada negativamente, rodeada por cationes de carga positiva atraídos a la superficie para equilibrar las cargas y las moléculas de agua se difunden hacia la superficie.

Cuando se combinan los cationes del CaO se rempazan los cationes de la capa de agua alrededor de las láminas de arcilla y se produce una inmediata disminución de dicha capa, lo que da paso a la floculación y aglomeración de las partículas de arcilla por la disminución de las moléculas de agua de la superficie de las arcillas permitiendo un mayor contacto entre las partículas de arcilla.

El óxido de calcio (CaO) al reaccionar con el agua (hidratación) se transforma en hidróxido de calcio (Ca(OH)₂). Durante este proceso se libera gran cantidad de calor (reacción exotérmica).



La cal reacciona químicamente con el agua, la sílice y la alúmina disponibles del suelo arcilloso, formando reacciones puzolánicas como lo son los silicatos cálcicos hidratados (CSH) y los aluminatos cálcicos hidratados (CAH), similares a los formados durante la hidratación del cemento Portland (Terrel et al., 1979), [8].



El pH de una solución acuosa, saturada con cal es de 12.45, a 25 °C. Así, un sistema cal-agua tiene el pH suficientemente alto para solubilizar la sílice y la alúmina de la arcilla y producir la reacción puzolánica. *Por lo tanto, siempre y cuando se mantenga suficiente calcio residual de la cal en el sistema y el pH permanezca lo suficientemente alto como para mantener la solubilidad, la reacción puzolánica continuará (Little, 1987).*

La carbonatación con cal es una reacción indeseable que también puede ocurrir en mezclas suelo-cal. En esta reacción, la cal reacciona con dióxido de carbono para formar carbonato de calcio en lugar de los CAHs y CSHs cementantes.

2.5. MEJORAMIENTO DE SUELOS ARCILLOSOS CON CAL

Existen diferentes métodos disponibles en la literatura para modificar las propiedades de las arcillas, el estudio realizado se enfoca en la estabilización química a base de CaO y en la densificación de los materiales.

La necesidad de investigar de manera formal las modificaciones a las propiedades de los materiales arcillosos con cal surge en la década de 1940. A partir de la década de 1950, [4] en países como Estados Unidos, Gran Bretaña, Francia, Australia, Alemania, República Checa, Malasia y Nigeria, se han elaborado programas de investigación sobre el tratamiento de suelos arcillosos con cal, con el fin de aprovecharlos para la construcción de infraestructura ferroviaria, aeroportuaria y en estructuras hidráulicas de tierra como: canales, bordos, presas y terraplenes.

Actualmente se tiene conocimiento de dos metodologías para el diseño y evaluación de suelos estabilizados con cal, una de ellas desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos (USACE, por sus siglas en inglés) y la otra desarrollada por la National Lime Association (NLA). Dichas metodologías se resumen en la “Tabla 2.2”, [10].

Para el caso de México, uno de los métodos más empleados en el ámbito de las vías terrestres, es la estabilización química con hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) o cemento Portland, empleado para modificar las propiedades de los materiales con altos porcentajes de materiales finos, favoreciendo la disminución de la humedad del suelo y permitiendo su trabajabilidad, convirtiéndolo en un material desmenuzable y acondicionándolo para su empleo en la estructura de pavimento.

Tabla 2.2. Diseño y evaluación de suelos estabilizados con cal

(USACE, 1994)	(NLA, 2004)
<p>Paso 1</p> <p>Contenido inicial de cal, mediante la valoración del pH de varias muestras de suelo cal preparadas con diferentes dosificaciones (2, 4, 6 y 8%). El contenido de cal más bajo con el cual se logra un pH de alrededor de 12,4 será el valor buscado.</p> <p>Paso 2</p> <p>Ensayos de humedad densidad para determinar la densidad máxima y el contenido de humedad óptima. ASTM D 1557 (Proctor Modificado).</p> <p>Paso 3</p> <p>Preparar muestras por triplicado de la mezcla suelo cal, para los ensayos de compresión no confinada y durabilidad. Los contenidos de cal a los cuales se deben de preparar las mezclas serán: el contenido de cal determinado en el paso 2 y, al 2 y al 4% por encima de éste. Curado de 28 días a 23 °C o curado acelerado por 48 h a 49 °C.</p> <p>Paso 4</p> <p>Tres especímenes se deberán de fallar a compresión no confinada (ASTM D1633), y otros tres especímenes deberán ser sometidos al ensayo de durabilidad (ASTM D559).</p> <p>Paso 5</p> <p>Se deberán de comparar los resultados obtenidos con los requerimientos solicitados de acuerdo con las especificaciones contractuales, o con las especificaciones recomendadas. El contenido de cal más bajo, el cual cumpla con los requerimientos para los resultados de compresión no confinada y demuestre la durabilidad requerida será el contenido de cal de diseño.</p>	<p>Paso 1</p> <p>Evaluar las propiedades claves del suelo como un paso inicial para determinar si el suelo es adecuado para a ser estabilizado con cal.</p> <p>Paso 2</p> <p>Determinación de la demanda estimada inicial de cal, el porcentaje más bajo de cal en el suelo que alcanza un pH en laboratorio de 12,4.</p> <p>Paso 3</p> <p>Determinación del contenido de humedad óptimo y la máxima densidad seca del suelo tratado con cal, mediante el procedimiento ASTM D698 (Proctor Estándar).</p> <p>Paso 4</p> <p>Fabricación de los especímenes para compresión no confinada (CI) ASTM D5102 procedimiento B. La muestra debe de ser almacenada en una bolsa sellada e impermeable por 1 a 24 h antes de fabricar el espécimen de ensayo.</p> <p>Paso 5</p> <p>Curado y confinamiento de los especímenes de compresión no confinada (CI). Inmediatamente después de la fabricación de los especímenes, deben de ser envueltos en plástico y sellados en una bolsa impermeable para impedir la pérdida de humedad. Posteriormente deben ser sometidos a un periodo de curado por 7 días a 40 °C. Someter los especímenes por 24 h a un remojo por capilaridad mediante la eliminación de la envoltura impermeable y envolviendo el espécimen con tela húmeda y absorbente, colocando el espécimen sobre una piedra porosa y evitando el contacto directo del agua con el espécimen.</p> <p>Paso 6</p> <p>Determinación de la compresión no confinada (CI) de los especímenes curados y condicionados en humedad. ASTM D5102 B para determinar la CI de los especímenes curados y condicionados en humedad. La CI es el promedio de al menos dos especímenes.</p>

2.6. EFECTOS DE LA CAL SOBRE MATERIALES ARCILLOSOS

La cal cambia considerablemente las características del suelo, ocasionando una disminución del contenido de agua (w) y del índice plástico (IP), además de un incremento en la resistencia y en la estabilidad volumétrica a largo plazo de los materiales modificados.

La acción de la cal sobre los suelos depende de la naturaleza de los mismos y del tipo de cal que se utilice. En suelos húmedos la adición de cal viva produce una reducción de la humedad existente por dos efectos, el consumo de agua de la cal para hidratarse y la evaporación debida a la reacción exotérmica durante dicha hidratación. De tal forma que con 1% de cal viva añadida se puede disminuir el contenido de agua del suelo en un rango de 3 a 5%. Por otra parte, la adición de cal hidratada sólo produce una disminución del agua debido a su humectación, lo que representa que para cada 1% de cal hidratada añadida se presente una reducción de la humedad del terreno del orden de un 0.3%.

Diversas referencias consideran a la modificación de suelos finos arcillosos como fase de la reacción suelo-cal para aumentar su trabajabilidad. Con pequeñas cantidades de cal viva o hidratada pueden lograr tal efecto, entre el 1 y el 3% del peso seco del suelo, [4].

La experiencia ha demostrado que la cal puede reaccionar con suelos de granulometrías medias y finas que tengan un contenido de arcilla mínimo del 7% y un índice de plasticidad mínimo de 10. [4]. Como guía general, Little [7] y otros especialistas, proponen que la estabilización con cal puede ser aplicada en suelos que tengan un índice de plasticidad mayor de 10 y más de un 25% de material fino que pase por el tamiz de 75 micras. Destacan los factores por los que se puede requerir de procesos constructivos especiales o de cantidades de cal adicional para lograr la efectividad de los resultados, como son, la presencia de materia orgánica o de sulfatos, en porcentajes mayores al 1 y al 0.3% respectivamente, [7],[8].

2.7. EFECTOS QUÍMICOS EN LA ESTABILIZACIÓN CON ÓXIDO DE CALCIO (CaO) EN SUELOS ARCILLOSOS

Las reacciones que se presentan al mezclar suelo con CaO se generan de forma inmediata.

La primera reacción independientemente de la cantidad de arcilla que posea el suelo es el secado, por la reacción exotérmica que genera la hidratación del CaO. Dicha reacción ocurre en un lapso de horas y facilita la trabajabilidad de los materiales húmedos, lo cual resulta, desde el punto de vista constructivo muy ventajoso, por permitir la continuidad de las actividades aún en ambientes afectados por el agua.

La segunda reacción es conocida como Modificación. Ocurre después de la mezcla inicial por efectos de la reacción del CaO con las partículas de arcilla y por la cual se produce un secado adicional y un incremento de la resistencia de los materiales. Los iones de calcio (Ca^{++}) emigran a la superficie de las partículas arcillosas desplazando el agua y otros iones. La reacción generada da paso a los procesos de “floculación y aglomeración” lo que convierte a las arcillas en un nuevo material, desmenuzable y de aspecto granular, lo que facilita su trabajabilidad y su compactación.

La tercera reacción es conocida como Estabilización. Ocurre cuando se adicionan las cantidades correctas de CaO y agua, incrementando el pH (ASTM D6276, [9]) de las mezclas, lo que permite romper las partículas de arcilla. En este proceso se libera sílice y alúmina, elementos que reaccionan con el calcio de la cal para formar los silicatos cálcicos hidratados (CSH) y los aluminatos cálcicos hidratados (CAH), semejantes a los formados en el cemento Portland y son los que contribuyen al incremento de resistencia de los suelos estabilizados. Estos efectos químicos ocurren desde las primeras horas y son duraderos y

además van mejorando con el tiempo a largo plazo, generando una matriz resistente, significativamente impermeable y de estructura flexible. Para lograr la estabilización de las arcillas, que por diversos factores no se logran estabilizar con cal, existen otros métodos o aditivos que pueden favorecer su comportamiento y los cuales quedan fuera de los alcances de la investigación.

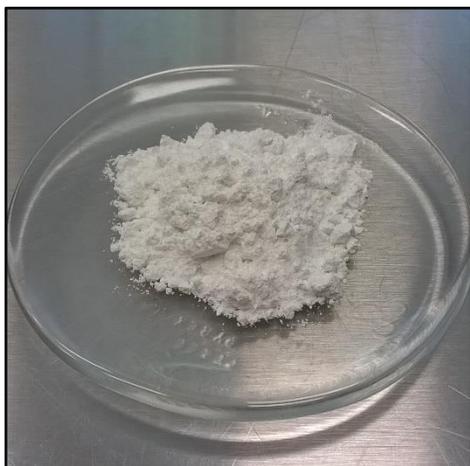
2.8. FACTORES QUE AFECTAN LA ESTABILIZACIÓN CON CAL

Debido a que para estabilizar un suelo deben presentarse las reacciones puzolánicas, los factores a considerar se describen en los puntos listados a continuación, [4], [8].

- Es necesario un contenido mínimo de arcilla del 7%.
- La meteorización del suelo, su drenaje y el pH existente son indicadores de la reactividad del suelo con la cal.
- La cantidad de materia orgánica puede afectar, incluso inhibir la reacción entre la cal y la superficie de los minerales de la arcilla. Como regla general, un contenido de materia orgánica superior al 1% puede interferir la reacción puzolánica.
- El contenido de sulfatos solubles puede afectar la estabilización mediante la reacción de los sulfatos solubilizados en el agua con los aluminatos cálcicos hidratados, producidos por la reacción puzolánica, formando Etringita (trisulfoaluminato cálcico). Material que resulta ser muy expansivo. Si el contenido total de sulfatos está por debajo del 0,3 por ciento, en peso, se considera aceptable, y en porcentajes mayores se requiere de soluciones especiales.

2.9. CaO EMPLEADO EN LA INVESTIGACIÓN

El óxido de calcio empleado en la investigación es de tipo pulverizado, con un alto grado de pureza y con las características listadas en la “Figura 2.1”.



- Óxido de calcio total 95% mínimo.
- Carbonato de calcio 10% máximo.
- Óxido de magnesio 1% máximo.
- Óxido de hierro o aluminio 1% máximo.
- Sílice 2% máximo.
- Humedad 2% máximo.
- Tamaño 90% mínimo que pase la malla 100.

Figura 2.1. Óxido de calcio empleado en la investigación

CAPÍTULO 3

CARACTERIZACIÓN DE SUELOS

3. CARACTERIZACIÓN DE SUELOS

Se presenta la descripción geotécnica y la metodología utilizada para determinar las propiedades índice de las muestras de suelo analizadas en la investigación, tanto para condiciones naturales como para las mezclas de suelo-CaO elaboradas con distintos porcentajes de CaO en peso respecto al suelo en estado natural (muestra integral), 5, 10, 15, 20 y 25%. Se analizan los efectos producidos por el CaO sobre los índices de Atterberg de la muestra de suelo S-1 ($w = 170\%$) para dos tiempos de fraguado distintos, de 1 y 48 h, respectivamente, medidos a partir del inicio de la mezcla suelo-CaO. Se describen y verifican las consideraciones empleadas en la ejecución de la investigación.

3.1. NORMATIVIDAD

Los procedimientos de laboratorio utilizados para la caracterización y el desarrollo de las pruebas realizadas en este capítulo se basan en la siguiente normatividad.

- ASTM D-4318. Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.
- British Standards Institution. BS1377. Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes.
- ASTM D 2487. Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).
- ASTM D 2216. Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass⁴.
- ASTM C117 - 13 Standard Test Method for Materials finer than 75-um (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing.
- ASTM D2974. Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils.
- ASTM C128 - 12 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate.

Los procedimientos listados no se detallan debido a que los conocimientos que se tienen de los mismos son ampliamente reconocidos y empleados en el ámbito de la geotecnia.

3.2. GENERALIDADES

Las propiedades índices de los suelos que sirven para conocer cualitativamente, el comportamiento mecánico de los suelos son: el contenido natural de agua (w), el peso volumétrico natural (γ), el grado de

saturación (S_r), la densidad de los sólidos (G_s), la granulometría, límite líquido (w_L), límite plástico (w_P), índice de plasticidad (IP), la relación de vacíos (e), la porosidad (n) y la contracción lineal (CL).

Atterberg (Albert Mauritz Atterberg, 1900) definió la metodología para describir la consistencia de los suelos de partículas finas mediante cuatro estados en que pueden presentarse; para ello, estableció los siguientes estados básicos: sólido, semisólido, plástico y líquido. Como se presenta en la “Figura 3.1”, líquido (w_L) es la frontera entre el estado líquido y el plástico; el límite plástico (w_P) es la frontera entre el estado plástico y el semisólido. El límite de contracción (w_s) separa el estado semisólido del sólido. A muy bajo contenido de agua, el suelo se comporta como un sólido frágil y cuando el contenido de agua es muy alto, el suelo fluye como un fluido viscoso; por tanto, dependiendo del contenido de agua, se observa alguno de los cuatro estados mencionados, [11].

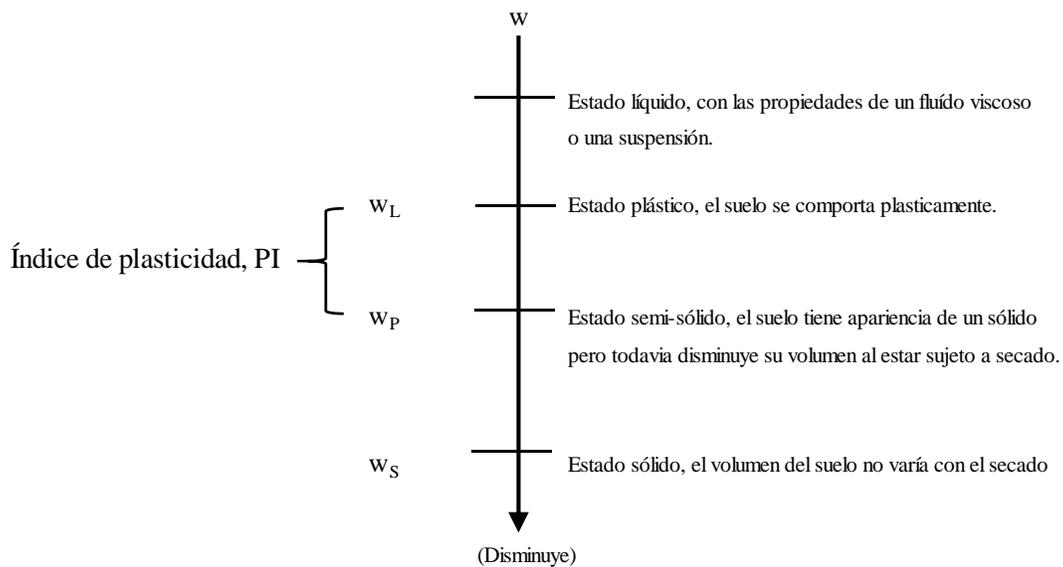


Figura 3.1. Diferentes estados del suelo (Das, B., 1999)

Manual de Diseño de Obras Civiles de CFE

3.3. DEFINICIONES

El límite líquido (w_L). Se define como el contenido de agua en porcentaje a partir del cual, cualquier incremento en la cantidad de ésta, producirá que un suelo en estado plástico se comporte como un líquido viscoso. Los métodos más comunes para determinar el w_L son la copa de Casagrande (Arthur Casagrande, 1932) y los métodos con conos penetrantes.

El método empleado en la investigación corresponde al cono sueco (Comisión Geotécnica de los Ferrocarriles Estatales Suecos, 1915), [12].

El límite plástico (w_P). Se define como el contenido de agua en porcentaje en el cual se desmorona en fragmentos de tamaño definido un rollo de suelo de 3.2 mm (1/8”) de diámetro.

El índice de plasticidad (PI). Es la diferencia entre el w_L y el w_P ; $PI = w_L - w_P$. Mide cuánta agua puede absorber un suelo antes de disolverse en una solución. Mientras más alto sea este valor, más plástico y más débil es el suelo.

Carta de plasticidad. La clasificación de los suelos según sus límites de consistencia se basa en el empleo de la carta de plasticidad, que relaciona el límite líquido, en las abscisas y el índice de plasticidad, en las ordenadas. La carta se divide en cuatro zonas principales por medio de dos rectas. La línea A separa las arcillas inorgánicas de los limos inorgánicos y corresponde a la ecuación $PI = 0.73(w_L - 20)$ y la segunda definida por la ecuación: $w_L = 50\%$ (Figura 3.2). A cada una de estas zonas les corresponden suelos con diferentes comportamientos mecánicos.

Clasificación de suelos. Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) [13], las pruebas de Atterberg, conjuntamente con la determinación granulométrica, son básicas para determinar las características de los materiales. Los símbolos de los grupos de los suelos de grano grueso son GW, GP, GM, GC, GC-GM, GW-GM, GW-GC, GP-GM y GP-GC. Por otro lado, los símbolos de los grupos de suelos de grano fino son CL, ML, OL, CH, MH, OH, CL-ML y Pt. Donde; W: bien graduado, P: mal graduado, L: de baja plasticidad y H: de alta plasticidad. Para realizar la clasificación de suelos de forma completa es necesario indicar para cada simbología el nombre de grupo, con base en los diagramas de flujo del SUCS, [11], [13].

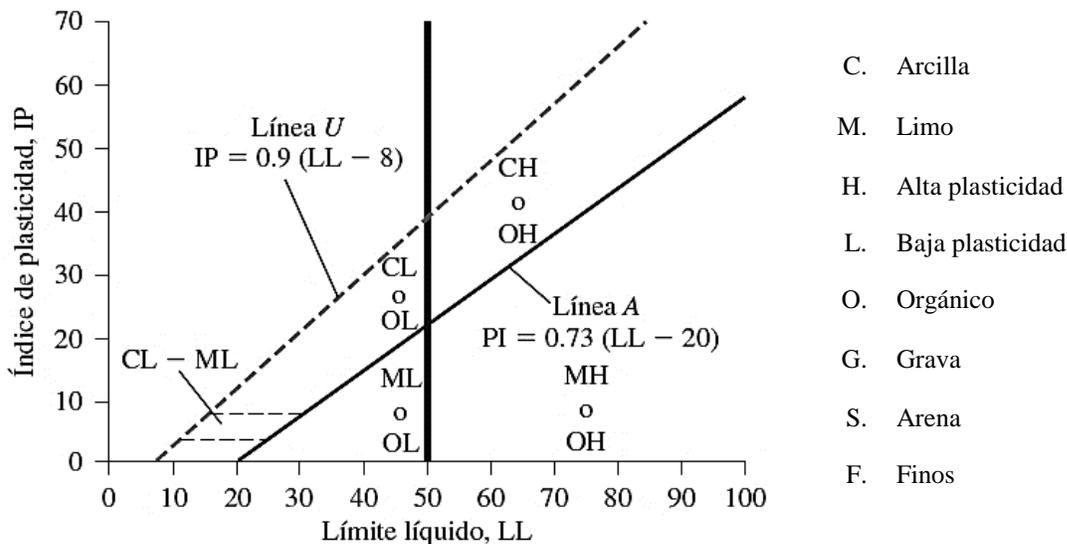


Figura 3.2. Carta de plasticidad para clasificación de los suelos de partículas finas en laboratorio, (Das, B., 2012)

3.4. CONSIDERACIONES DE EJECUCIÓN Y DE ANÁLISIS

Como parte de los efectos que tiene el CaO sobre los suelos analizados, reacciones químicas expuestas en el “CAPÍTULO 2”, tiene como finalidad facilitar la expulsión de las moléculas de agua del interior de las arcillas. Este efecto se presentó en la ejecución de las primeras pruebas del límite líquido (w_L) empleando la copa de Casagrande, lo que ocasionó un incremento en el margen de error por operación, impidiendo el llenado y ranurado del material durante el procedimiento de la prueba. Este hecho condujo al empleo del cono sueco como mejor opción en la determinación del w_L , sin embargo, es necesario precisar, que el efecto

del CaO sobre el suelo no se elimina mediante esta última metodología, pero si se logra una menor dependencia al factor humano [12].

Adicionalmente, se estudiaron los resultados de la referencia “Técnicas Alternativas para la Determinación del Límite Líquido de Suelos” por el investigador M.J. Mendoza [14]. Dicha referencia involucra las arcillas de la ciudad de México con w_L comprendidos en un rango de 30 a 390%, mismos que son representativos de las cuatro zonas de la carta de plasticidad y para los cuales se exponen correlaciones lineales con coeficientes de correlación muy próximos a la unidad entre las determinaciones de w_L obtenidos mediante la copa de Casagrande y el cono sueco e inglés. Se consideró aplicable entonces el uso de las siguientes conclusiones obtenidas por el autor, las cuales sirven de fundamento para la determinación de los límites de consistencia y su representación en la carta de plasticidad, mediante la metodología del cono sueco en el estudio de los suelos estabilizados con CaO.

- La ubicación de la arcilla de la ciudad de México en la carta de plasticidad, y con ello la obtención de su clasificación, puede hacerse utilizando el límite líquido que el cono sueco proporciona, toda vez que tanto el límite líquido como el PI resultan menores a los valores que arroja la copa; esto es, que en general la posición en las regiones de la carta no se modifica por el hecho de que sus datos provengan de determinaciones con copa o con cono.
- Se demuestra que en general la utilización del límite líquido obtenido con el cono sueco para clasificar un suelo fino según el SUCS, no conduce a una clasificación diferente a la que se alcanza con la copa de Casagrande; las diferencias en el límite líquido (abscisas) también modifican al índice plástico (ordenadas), dando como resultado desplazamientos en las coordenadas sensiblemente paralelos a la línea A.
- Correlación del límite líquido del cono sueco con el PI, [14].

$$PI = w_{L \text{ Cono sueco}} - w_P \quad (3.1)$$

$$PI = 0.715w_{L \text{ Cono sueco}} - 24.2 \quad (3.2)$$

Donde:

$w_{L \text{ Cono sueco}}$ = Límite líquido determinado con el cono sueco.

w_P = Límite plástico.

PI = Índice de plasticidad.

3.5. TRABAJOS DE LABORATORIO

3.5.1. Muestras de suelo analizadas.

En la “Tabla 3.1” se presentan las características iniciales de los materiales analizados en la investigación.

Tabla 3.1. Características iniciales de las muestras

Muestra		S-1	M-1	M-2
Ubicación		Plataforma 1	CFE-II	Grupo de Oro
Profundidad, (m)		0.5	0.5	0.5
Contenido de agua	w (%)	170	100	55
Granulometría				
Gravas	G (%)	0	0	0
Arenas	S (%)	1.32	0.87	13.12
Finos	F (%)	98.68	99.13	86.88
Materia orgánica	(%)	0	0	0
SUCS		CH	CH	CH
Nombre de grupo		Arcilla de alta plasticidad	Arcilla de alta plasticidad	Arcilla de alta plasticidad

3.5.2. Variación del IP y w_p .

A continuación se presentan los resultados obtenidos mediante la aplicación de las ecs. 3.1 y 3.2 en la determinación de los límites de Atterberg y se comparan con los resultados obtenidos en el laboratorio, “Tabla 3.2”. Las pruebas de laboratorio se realizaron después de la primera hora de mezclado y únicamente para la muestra de suelo S-1, con el fin de ratificar la aplicabilidad de las ecuaciones.

Tabla 3.2. Muestra S-1, variación de IP y w_p

% CaO	w_L , (%)	w_p , (%)		IP, (%)	
		1 h	ec. 3.1	1 h	ec. 3.2
5	155.20	71.41	68.43	83.80	86.77
10	132.35	72.86	61.92	59.49	70.43
15	115.30	44.90	57.06	70.39	58.24
20	108.67	55.33	55.17	53.34	53.50
25	103.79	55.81	53.78	47.98	50.01

La “Figura 3.3” muestra la variación del w_p obtenido mediante los dos métodos empleados para su determinación, por medio del rollo de suelo de 3.2 mm y por medio de la ecuación 3.1 (como función del w_L con $w_{L\text{ cono sueco}}$). El comportamiento global o de regresión lineal para las dos series de datos analizadas es similar, con una variación máxima del orden del 3.5% correspondiente al suelo sin CaO, misma que tiende a disminuir con el incremento del porcentaje del CaO adicionado.

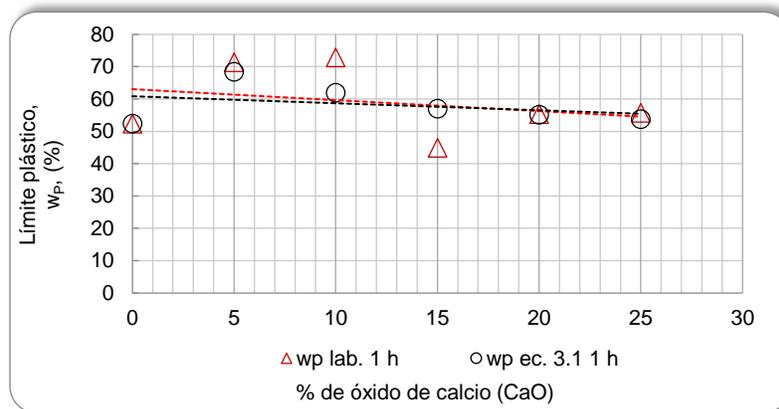


Figura 3.3. Variación del w_P y la ec. 3.1

La “Figura 3.4” muestra la variación del IP obtenido mediante los dos métodos empleados para su determinación, por medio de la expresión $PI = w_L - w_P$ y por medio de las ecs. 3.1 y 3.2 (como función del w_L cono suco). El comportamiento global o de regresión lineal para las dos series de datos analizadas es similar, con una variación máxima del orden del 2.5% correspondiente al suelo sin CaO, misma que tiende a disminuir con el incremento del porcentaje del CaO adicionado.

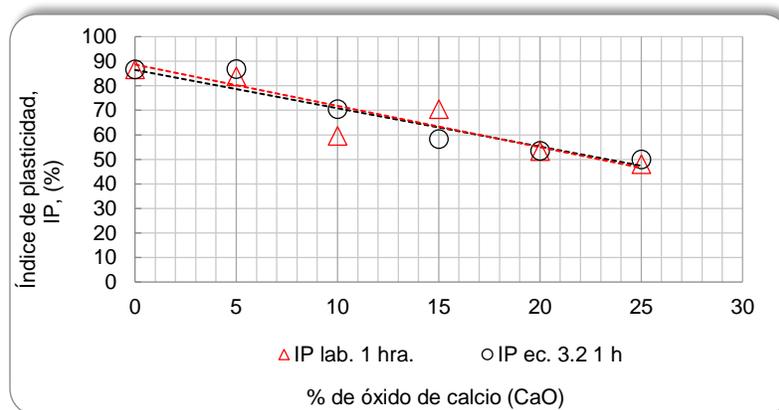


Figura 3.4. Variación del IP y la ec. 3.2

Los resultados obtenidos permiten ratificar el empleo de las ecs. 3.1 y 3.2 en la investigación desarrollada.

3.5.3. Límites de Atterberg y su variación por la adición de CaO.

Para estudiar los efectos a corto plazo por la adición de CaO sobre la muestra de suelo S-1 se analizó la variación de los límites de Atterberg, “Tabla 3.3”. Para evaluar el desempeño de las mezclas fue necesario considerar los tiempos de ejecución en los procesos constructivos, de acuerdo con los métodos empleados por la ANFACAL durante la construcción de las plataformas de prueba, resultando en promedio dos tiempos (1 y 48 h) medidos a partir del inicio del mezclado de los materiales (suelo-CaO) entre las etapas de mezclado y compactación. Estas pruebas se realizaron únicamente para la muestra de suelo S-1, con la finalidad de determinar si las variaciones que se pueden presentar en campo por efectos de tiempos de reacción influyen en el comportamiento de las mezclas.

Tabla 3.3. Muestra S-1, mezcla de suelo-CaO para 1 y 48 h

% CaO	w _L , (%)		w _P , (%)		IP, (%)	
	1 h	48 h	1 h	48 h	1 h	48 h
0	139.04	---	52.45	---	86.59	---
5	155.20	167.70	71.41	87.74	83.80	79.95
10	132.35	150.66	72.86	71.67	59.49	78.99
15	115.30	137.48	44.90	67.42	70.39	70.06
20	108.67	126.95	55.33	70.81	53.34	56.15
25	103.79	113.89	55.81	68.38	47.98	45.51

Las “Figuras 3.5 a 3.7” muestran la variación de los límites de Atterberg obtenidos según el periodo de fraguado. El comportamiento global o de regresión lineal para las series de datos analizadas según el periodo de fraguado es similar, con variaciones en promedio para igual porcentaje de CaO del orden de 23.8, 18.2 y 4.3%, para el w_L, w_P y el IP, respectivamente. Lo anterior supone un incremento en el estado plástico previo al fraguado de las mezclas durante un determinado lapso de tiempo en el w_L y en el w_P, los cuales por definición del IP no representan un cambio significativo de este último parámetro, (inciso 3.3). De acuerdo con los resultados obtenidos el tiempo establecido en la presente investigación para estudiar los efectos de la adición de CaO a las muestras de suelo será de 1 h.

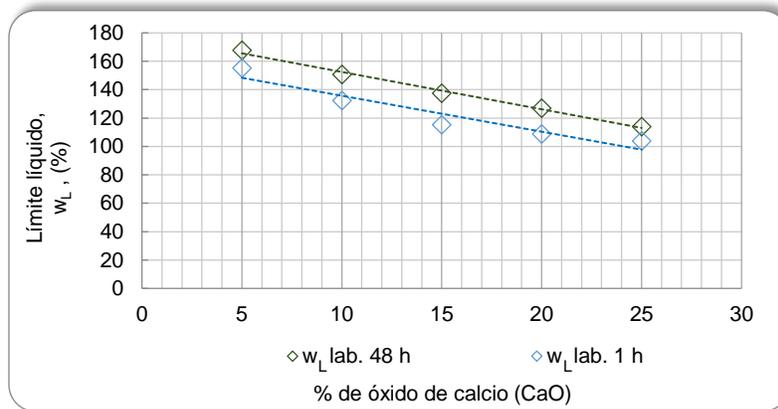


Figura 3.5. Variación del w_L y el tiempo de fraguado

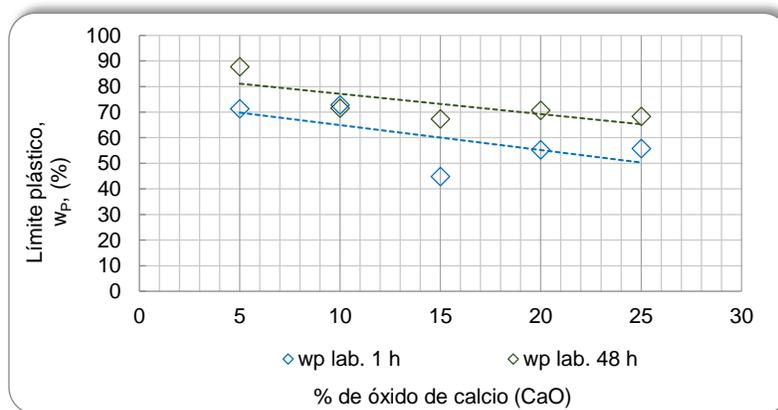


Figura 3.6. Variación del w_P y el tiempo de fraguado

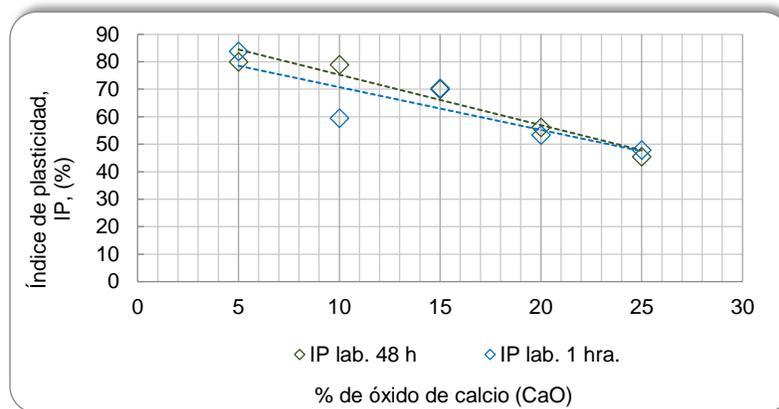


Figura 3.7. Variación del IP y el tiempo de fraguado

3.5.4. Límites de Atterberg y su determinación por cono sueco.

Según lo descrito en el inciso 3.4, se presentan a continuación los resultados obtenidos para las tres muestras de suelo descritas en el inciso 3.5.1. (S-1, M-1 y M-2), “Tabla 3.4 a Tabla 3.6”.

Tabla 3.4. Muestra S-1, mezcla de suelo-CaO

% CaO	w _L , (%)	w _P , (%)	IP, (%)	G _s
0	139.04	52.45	86.59	2.72
5	155.20	68.43	86.77	2.73
10	132.35	61.92	70.43	2.59
15	115.30	57.06	58.24	2.46
20	108.67	55.17	53.50	2.49
25	103.79	53.78	50.01	2.31

Tabla 3.5. Muestra M-1, mezcla de suelo-CaO

% CaO	w _L , (%)	w _P , (%)	IP, (%)	G _s
0	122.74	45.14	77.60	2.85
5	150.20	67.01	83.19	2.74
10	117.27	57.62	59.65	2.72
15	113.65	56.59	57.06	2.67
20	103.19	53.61	49.58	2.57
25	109.83	55.50	54.33	2.59

Tabla 3.6. Muestra M-2, mezcla de suelo-CaO

% CaO	w _L , (%)	w _P , (%)	IP, (%)	G _s
0	68.21	29.72	38.49	2.63
5	79.34	46.81	32.53	2.69
10	81.59	47.45	34.14	2.56
15	75.44	45.70	29.74	2.54
20	91.29	50.22	41.08	2.47

Las “Figuras 3.8 a 3.10” muestran la variación del w_L , w_P y el IP en función del porcentaje de CaO adicionado, posterior a la primera hora del mezclado. La tasa de variación (pendiente de la recta) del w_L es: -1.90 para la muestra S-1, -1.20 para la muestra M-1 y +0.85 para la muestra M-2. La tasa de variación del w_P , es: -0.22 para la muestra S-1 y +0.06 para la muestra M-1 y +0.80 para la muestra M-2. La tasa de variación del IP es -1.69 para la muestra S-1, -1.26 para la muestra M-1 y +0.05 para la muestra M-2.

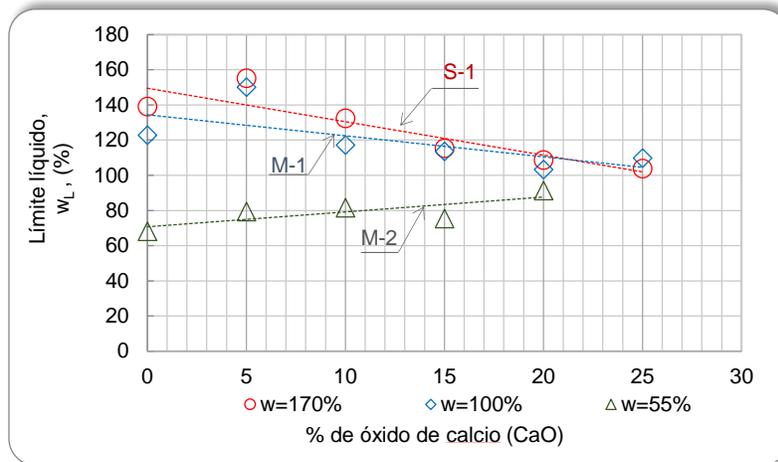


Figura 3.8. Variación del w_L y el % de CaO

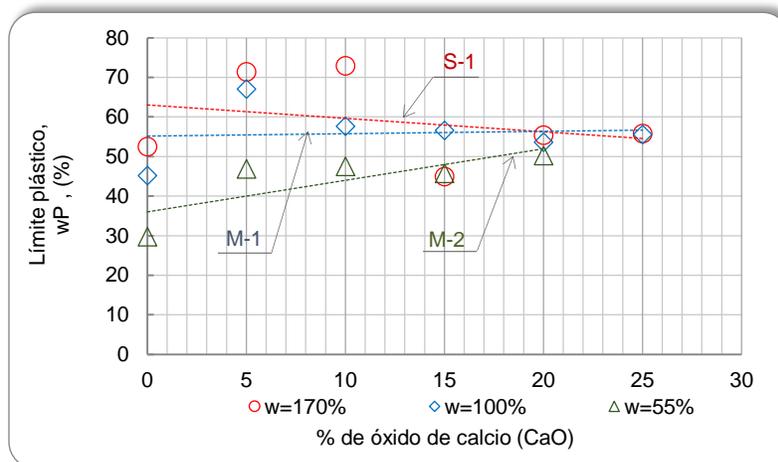


Figura 3.9. Variación del w_P y el % de CaO

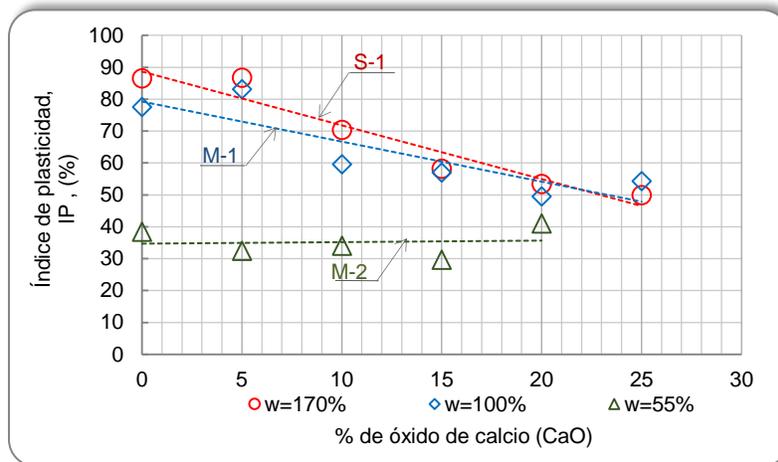


Figura 3.10. Variación del IP y el % de CaO

3.5.5. Densidad de sólidos.

La “Tabla 3.7” muestra la variación de la Gs en función del porcentaje de CaO adicionado, posterior a la primera hora del mezclado. La tendencia general observada en las tres muestras de suelo analizadas (Figura 3.11) es en decremento de la Gs, es decir, a mayor porcentaje de CaO adicionado la Gs disminuye a corto plazo.

Tabla 3.7. Densidad de sólidos, Gs

% CaO	S-1	M-1	M-2
0	2.72	2.85	2.63
5	2.73	2.74	2.69
10	2.59	2.72	2.56
15	2.46	2.67	2.54
20	2.49	2.57	2.47
25	2.31	2.59	---

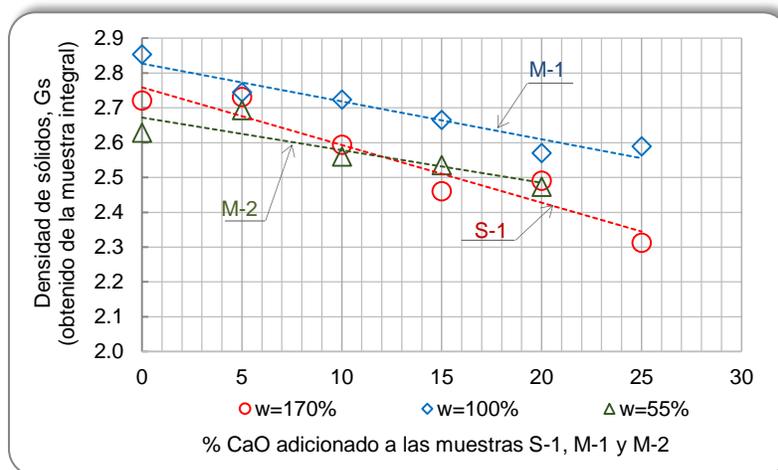


Figura 3.11. Variación Gs y el % de CaO

3.5.6. Límites de Atterberg y su determinación por cono sueco, para muestras inalteradas.

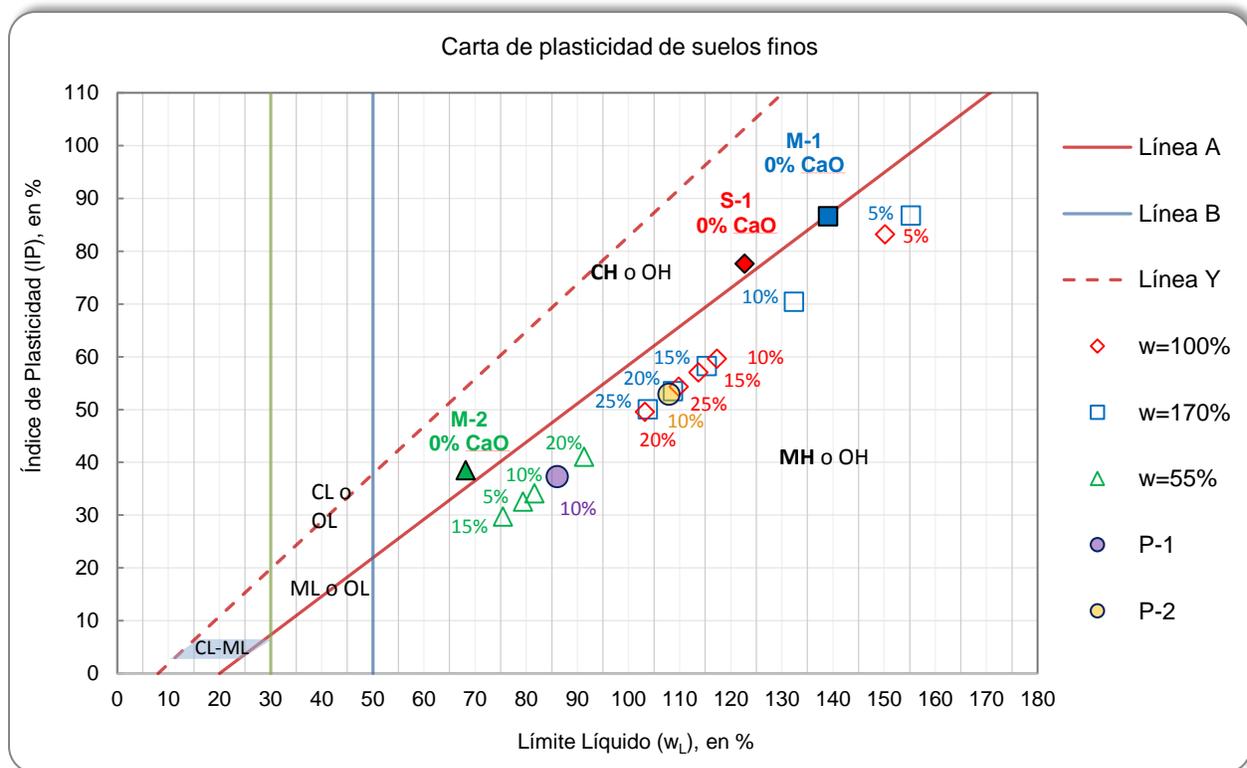
Las muestras inalteradas obtenidas de las plataformas de prueba se sometieron al mismo procedimiento empleado en los incisos anteriores para caracterizar los materiales, ver “Tabla 3.8”. Las plataformas “Plataforma 1” y “Plataforma 2” se construyeron mediante la aplicación del 10% CaO y tienen una edad aproximada respecto a la fecha de muestreo de 12 y 9 meses, respectivamente.

Tabla 3.8. Muestra P-1 y P-2, plataformas de prueba (ANFACAL)

Muestra	w _L , (%)	w _P , (%)	IP, (%)	w (%)	G _s
P-1	86.03	48.72	37.31	54.27	2.71
P-2	107.89	54.95	52.94	56.71	2.70

3.5.7. Carta de plasticidad.

Los resultados de las muestras analizadas se grafican en la carta de plasticidad (Figura 3.12) y se identifica la disminución de los pares del IP y w_L, en función del % de CaO adicionado.



ML : Límos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas ligeramente plásticas.
 CL : Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas arenosas o limosas.
 OL : Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.
 MH : Limos inorgánicos, limos elásticos, suelos micáceos o diatomáceos, arenosos finos o limosos.
 CH : Arcillas inorgánicas de alta plasticidad.
 OH : Arcillas orgánicas de mediana o alta plasticidad.

Figura 3.12. Carta de plasticidad y comportamiento de mezclas de suelo con CaO

3.6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Según los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio, se evidencia la modificación de las propiedades índice de las muestras de suelo (arcilla) con la adición del porcentaje en peso del CaO.

Los alcances de la investigación únicamente cubren la interpretación de las tendencias generales de los parámetros necesarios que permitirán caracterizar el comportamiento de las mezclas de suelo-CaO y la determinación del porcentaje óptimo necesario para estabilizar las arcillas del NAICM.

Las variables analizadas en este capítulo son: % CaO, w_L , w_P , IP, Gs y tiempo de fraguado.

Los resultados del inciso 3.5.2 ratifican la aplicación de las expresiones 3.1 y 3.2 en la investigación para la determinación de los límites de Atterberg, observándose una tendencia lineal similar, con un margen de error mínimo.

Los resultados del inciso 3.5.3 indican que existe una variación en los parámetros por efectos del tiempo de fraguado (1 y 48 h), con tendencias de regresión lineal paralelas. El paso del tiempo incrementa el w_L y el w_P ; sin embargo, el IP prácticamente se conserva con una variación promedio del 4.3% y una variación máxima del orden del 7.0% correspondiente a los pares de puntos para un 5% de CaO, valor que tiende a disminuir conforme se incrementa el porcentaje de CaO adicionado.

Para efectos de la reproducción en campo de los resultados obtenidos en el laboratorio, se considera que después de iniciar la mezcla de suelo-CaO se dispone de un margen de tiempo de 1 y 48 h previo al inicio de los trabajos de compactación; sin embargo, de acuerdo con la secuencia constructiva (ANFACAL), en la cual la compactación se inicia después de la primera hora del mezclado, se analizará entonces el comportamiento de las mezclas bajo esta última condición, “CAPÍTULO 4”.

Los resultados del inciso 3.5.4 permiten establecer una tendencia general en los límites de Atterberg en función del porcentaje de CaO adicionado, es decir, para los suelos con contenido de agua mayor de 100% se presenta una tendencia de disminución del w_L y en menor medida una disminución del w_P y consecuentemente una reducción del IP. Las tasas de reducción del IP en función del porcentaje de CaO resultan del orden del -1.69, -1.26 y +0.05, para las muestras S-1, M-1 y M-2, respectivamente.

Para la muestra de suelo con contenido de agua de 55% (M-2), los comportamientos generalizados de los parámetros determinados presentan una tendencia contraria o tasa de variación positiva, debido a que la cantidad de CaO adicionada resulta excesiva ante el bajo contenido de agua del suelo, es decir, por la baja cantidad de agua que posee el suelo no permite la reacción de la totalidad del CaO. Estos efectos dificultan la manipulación y compactación de las mezclas.

Los resultados del inciso 3.5.5 permiten observar la disminución generalizada de la Gs para las tres muestras analizadas.

Los resultados del inciso 3.5.6 permiten verificar razonablemente el efecto de la estabilización de los suelos superficiales del NAICM en campo.

Al comparar los resultados obtenidos en el laboratorio para el parámetro IP de la mezcla S-1 adicionada con 10% de CaO (Tabla 3.4) y los resultados de la muestra P-1 (Tabla 3.8), de 70.43 y 37.31% respectivamente, se puede interpretar entonces, que los efectos de la estabilización continúan modificando la humedad de las mezclas propiciando la disminución del IP como se presenta en la “Figura 3.13”. La

figura muestra la variación de los límites de Atterberg (w_L , w_P e IP) para periodos de fraguado de 1, 48 y 10,080 h (muestra ensayada a 420 días de su construcción).

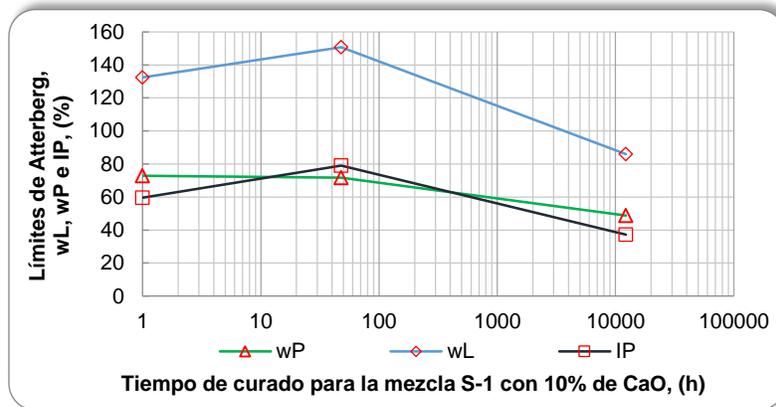


Figura 3.13. Comparación de límites de Atterberg para diferentes periodos de fraguado 1, 48 y 10,080 h (420 días), mezcla de suelo S-1 con 10% de CaO

Los resultados del inciso 3.5.7 indican el cambio de clasificación SUCS de las diferentes muestras de arcilla. El efecto del CaO sobre las arcillas del NAICM clasificadas como CH, modifica los índices de Atterberg de las muestras de suelo analizadas como se mencionó anteriormente, creando un nuevo material clasificado como MH, lo que lo convierte en un material desmenuzable. A mayor porcentaje de CaO adicionado menor IP y menor w_L .

CAPÍTULO 4

COMPACTACIÓN DE SUELOS

4. COMPACTACIÓN DE SUELOS

En este capítulo se hace mención al objetivo general de la compactación y a sus efectos sobre los suelos. Se describen las consideraciones y la metodología empleada para determinar las curvas de compactación de las mezclas de suelo-CaO para diferentes proporciones en peso, 5, 10, 15, 20 y 25%, denominadas “Curvas por deshidratación química”. Se presentan los resultados de las curvas de compactación para mezclas de igual porcentaje de CaO, denominadas “Curvas por deshidratación química y secado ambiente” elaboradas en el laboratorio y finalmente se realizan los comentarios y el análisis de los resultados obtenidos.

4.1. NORMATIVIDAD

El procedimiento de laboratorio empleado en este capítulo, se basa en la siguiente normatividad.

- ASTM D-698. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort.

El procedimiento listado no se detalla, debido a que los conocimientos que se tienen del mismo, es ampliamente reconocido y empleado en el ámbito de la geotecnia. Las modificaciones y consideraciones en la implementación de dicha normatividad se describen en el inciso 4.4.

4.2. GENERALIDADES

Se tiene conocimiento de que la compactación es un método económico y muy antiguo de mejoramiento de suelos, el cual se puede definir como el proceso mecánico a través del cual la masa de un suelo logra incrementar su peso por unidad de volumen y reducir su relación de vacíos. La finalidad de la compactación de los suelos en laboratorio es la de reproducir teóricamente las condiciones de campo. Sus efectos favorecen en distintos grados algunas propiedades mecánicas e hidráulicas de los mismos, por ejemplo, el incremento de resistencia a la compresión y al cortante, la reducción de la compresibilidad, la deformabilidad, la permeabilidad y la susceptibilidad a la erosión por el agua. La única propiedad que no presenta mejoría es la expansión, [15].

El grado al cual se puede compactar el suelo depende de factores como: la clasificación del suelo, el contenido de agua, el tipo y cantidad de energía de compactación. Por otro lado, los métodos de compactación de laboratorio dependen de la forma en que se aplica la energía y puede ser de forma estática, dinámica, por amasado y por vibración. Los métodos de compactación sugeridos, de acuerdo con el tipo de suelo se presentan en la “Tabla 4.1”, [18].

Tabla 4.1. Método de compactación de acuerdo al tipo de suelo

Material	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Presión	Malo	Malo	Bueno	Muy bueno
Amasado	No aplica	Bueno	Excelente	Excelente
Impacto	Pobre	Pobre	Bueno	Excelente *
Vibración	Bueno	Excelente	Pobre	Malo

* Con confinamiento.

La compactación de suelos granulares genera un reacomodo de las partículas del suelo que depende tanto del contenido de agua que permita dicho reacomodo (efecto de lubricación), así como de la fricción entre partículas para mantenerse unidas. Debido al tamaño de los granos permite una mayor facilidad en su compactación, a diferencia de los suelos arcillosos.

La compactación de los suelos finos arcillosos tiene el inconveniente de contener aire atrapado en el interior del material, independientemente de la cantidad de energía que se aplique, lo que implica que no se logre la saturación y la expulsión de agua, [18]. Las partículas de arcilla se pegan unas con otras con la humedad y consecuentemente mantienen su forma.

El método más usual para determinar el grado de compactación es la densidad Proctor.

Proctor (1933), [15], [16], [17] publicó una serie de artículos donde describe los resultados de los estudios relativos a los procedimientos de evaluación de la compactación y define las bases necesarias para su determinación en laboratorio mediante la prueba de compactación dinámica. La prueba de compactación fue ideada para representar en laboratorio los trabajos realizados en campo por los equipos de compactación disponibles. Dicha prueba ha sido normada por la ASTM y empleada para determinar la relación que existe entre el peso volumétrico seco (γ_d), el contenido de agua (w) y la energía de compactación (E_c).

Las pruebas de laboratorio estándar empleadas para evaluar la compactación de distintos tipos de suelo son entonces: la prueba Proctor estándar (designación ASTM D-698) y la prueba Proctor modificada (designación ASTM D-1557). El uso de cada una de ellas dependerá de los requerimientos específicos de cada proyecto que se requiera evaluar. Para efectos de la investigación y del desarrollo del presente capítulo, no se cubre la prueba Proctor modificada.

4.3. DEFINICIONES

Prueba Proctor estándar. Es un ensayo que se reproduce en laboratorio el cual consiste en colocar dentro de un molde metálico de dimensiones establecidas, suelo en tres capas sucesivas, compactadas una a una, dejando caer un pisón de manera uniforme con peso, dimensiones, altura de caída (libre) y repeticiones determinadas. Este procedimiento define entonces, un solo punto en la curva de compactación y para obtener los puntos restantes (5 puntos o más) se debe tener material disponible con humedades distintas entre sí, lo que permitirá entonces la elaboración completa de la curva de compactación representativa del suelo analizado, “Figura 4.1”.

Energía específica de compactación. Se define como la cantidad de energía por unidad de volumen y se cuantifica mediante la siguiente expresión:

$$E_c = \frac{W h n N}{V} \quad (4.1)$$

Donde:

W = Peso del pisón; 5,5 lbf (24,4 N).

h = Altura de caída del pisón; 12" (30.48 cm).

n = Número de capas; 3.

N = Número de golpes por capa; 25.

V = Volumen del molde de 4" (10.16 cm) y altura de 5" (12.70 cm).

E_c = Energía específica; 12 400 lb-pie/pie³ (600 kN-m/m³).

Nota: conforme se incrementa la energía de compactación, se incrementa el peso volumétrico seco máximo (PVSM), mientras que el contenido de agua óptimo ($w_{\text{ópt.}}\%$) disminuye.

Curva de compactación. Es la representación gráfica de la prueba bajo la misma energía dinámica de compactación tipo Proctor.

En la "Figura 4.1" se observa que en la medida en que se incrementa a partir de cero el contenido de agua ($w\%$) se tiene un aumento en el eje de los pesos volumétricos secos (γ_d), causado por efecto de lubricación de la superficie de las partículas de suelo, lo que permite su reacomodo hasta un grado máximo. A esta zona se le conoce como "rama seca". Por otro lado, si se continua con incrementos en el contenido de agua ($w\%$) los pesos volumétricos secos correspondientes disminuyen, debido al aumento del agua que impide que las partículas de suelo se unan, absorbiendo la energía de compactación aplicada. A esta zona se le conoce como "rama húmeda".

Contenido de agua óptimo. Proctor definió como contenido de agua óptimo ($w_{\text{ópt.}}\%$) al valor de la humedad en la que se tiene el PVSM, para la energía de compactación de su prueba, equivalente a: $E_c = 12400 \text{ lb} - \text{pie}/\text{pie}^3$ (600 kN - m/m³).

Curva de saturación. Es la relación calculada entre la humedad y el peso volumétrico seco para un grado determinado de saturación constante. La curva de saturación al $S_r = 100\%$ se refiere a que todos los espacios vacíos del suelo compactado están llenos con agua. Ninguna curva de compactación puede encontrarse a la derecha de la curva de saturación o la línea de cero aire y cero vacíos.

La ecuación que relaciona la saturación (al 100%) del suelo compactado con la humedad y el peso volumétrico seco es:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_w}{w + 1/G_s} \quad (4.2)$$

Donde:

γ_w = Peso volumétrico del agua; 9.807 kN/m³

w = Contenido de agua; %

G_s = Densidad de sólidos.

γ_d = Peso volumétrico seco.

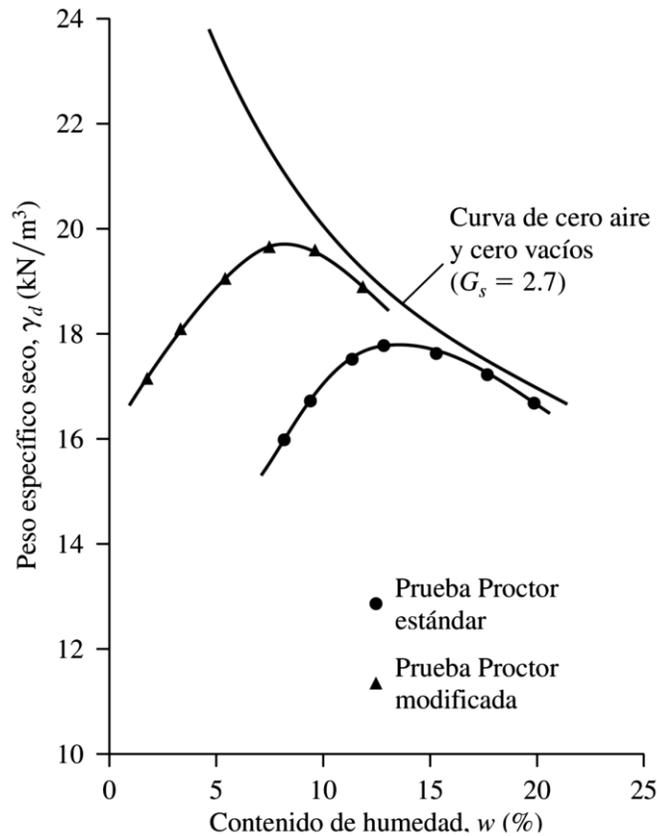


Figura 4.1. Curvas de compactación Proctor estándar y modificada para un limo arcilloso (método A), (Das, B., 2012).

4.4. CONSIDERACIONES DE EJECUCIÓN Y DE ANÁLISIS

Según los resultados obtenidos en el “CAPÍTULO 3”, una de las modificaciones que produce el CaO sobre los materiales analizados es la disminución del $w\%$ y, por otro lado, el conocimiento de los procesos de colocación de CaO en campo permiten la reproducción teórica de curvas de compactación en laboratorio después de la primera hora de mezclado, e iniciar la construcción de la misma, a partir de la rama húmeda a la rama seca (mediante el secado del material a temperatura ambiente), considerando las siguientes hipótesis listadas a continuación:

1. La compactación del suelo no requiere de incorporar agua adicional en campo debido al alto contenido de agua que posee. Las curvas de compactación se construyeron a partir de la rama húmeda y hacia la rama seca.
2. La variación en porcentaje del CaO en peso define para cada suelo analizado, la tendencia en la disminución de la humedad en campo, denominada “Curva por deshidratación química”.

3. Para un porcentaje de CaO constante se puede elaborar una curva de compactación particular, denominada “Curva por deshidratación química y secado ambiente”.
4. Desde el punto de vista geotécnico existe una relación entre las curvas de compactación obtenidas en los puntos 2, 3 y el porcentaje de CaO óptimo; es decir, la relación que existe entre la curva de compactación esperada en campo (por deshidratación química) y la curva de compactación para un porcentaje de CaO definido (por deshidratación química y secado a temperatura ambiente), es la proximidad entre los valores esperados en campo del $w\%$ y el $w_{\text{ópt}}\%$, lo que garantizará un grado de compactación adecuado.

La adición del CaO en campo consiste en cinco etapas generales. Etapa 1. Despalme, Etapa 2. Tendido superficial del CaO sobre el terreno natural, Etapa 3. Mezclado, Etapa 4. Nivelación, y Etapa 5. Compactación.

Con la finalidad de generar las curvas de compactación correspondientes a las mezclas suelo-CaO fue necesario elaborar probetas de dimensiones particulares, de 3.60 cm de diámetro y 9.0 cm de altura. Para ello se recurrió a la metodología de compactación dinámica en el molde miniatura.

4.4.1. Compactación dinámica en molde miniatura.

El molde miniatura empleado, fabricado en el Instituto de Ingeniería (Flores y Romo, 2003), consiste en un molde partido de 3.60 cm de diámetro por 9 cm de altura y un pisón con masa y altura de caída definido, [19].

Como parte de los trabajos realizados (Flores y Romo, 2003), para realizar la calibración de la metodología se obtuvieron tres curvas de compactación, con tres energías diferentes, como se presenta en la “Figura 4.2”.

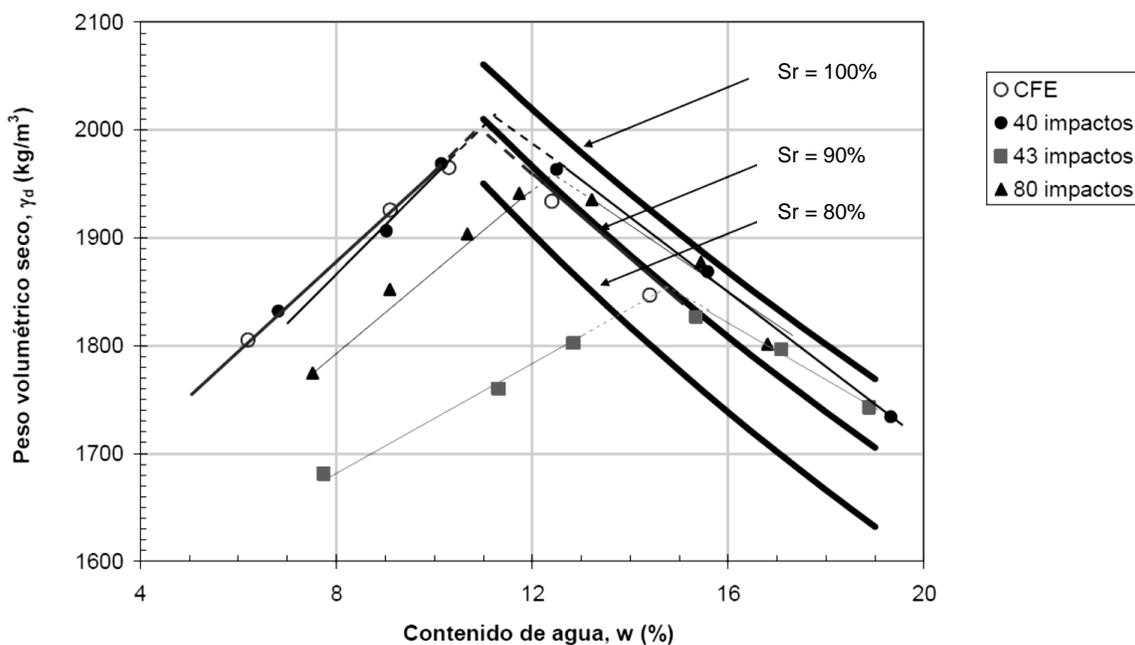


Figura 4.2. Curvas de compactación con diferentes energías. (Flores y Romo, 2003)

La energía considerada para la ejecución de las pruebas de compactación desarrolladas en este capítulo corresponde a 40 impactos, utilizando el pisón de 0.198 kg de masa y 25 cm de altura de caída, 7 capas de suelo y volumen de 89.88 cm³, “Figura 4.3”, generando una energía equivalente de 15.40 kg-cm/cm³. Con esta energía se obtuvo una curva de compactación semejante a la obtenida con el molde Proctor [19]. Tomando como base los resultados obtenidos por los autores, se consideró entonces, aplicable dicha metodología para determinar las curvas de compactación de las mezclas de suelo-CaO presentadas en el inciso 4.5.



Figura 4.3. Molde miniatura con extensión y pisón, (Flores y Romo, 2003)

4.5. TRABAJOS DE LABORATORIO

Los trabajos consistieron inicialmente con la elaboración de una serie de probetas de 3.60 cm de diámetro por 9 cm de altura, por cada una de las muestras de suelo analizadas (S-1, M-1, M-2) y con porcentajes de CaO variables, como se indica en la “Tabla 4.2”. Las probetas fueron fabricadas en el molde miniatura y de las cuales se determinó su humedad de compactación (Figura 4.4 y Figura 4.5) para definir las “Curvas por deshidratación química” y las “Curvas por deshidratación química y secado ambiente”, que se detallan en el inciso 4.5.1 y 4.5.2, respectivamente.



Figura 4.4. Material mezclado con CaO

El ensayo de compactación en el molde miniatura consistió en colocar dentro de un molde metálico de dimensiones establecidas el suelo en siete capas sucesivas, compactadas una a una, dejando caer un pisón de manera uniforme con 0.198 kg de masa, dimensiones y volumen de 89.88 cm³, altura de caída 25 cm (libre) y 40 repeticiones, [19].

La “Tabla 4.2” muestra la variación del contenido de agua en función del porcentaje de CaO adicionado. La tasa de variación (pendiente de la recta, Figura 4.5) del w% es: -3.0 para la muestra S-1, -1.5 para la muestra M-1 y -1.3 para la muestra M-2; es decir, que por la adición del 1% de CaO disminuye la humedad en las variaciones mencionadas.

Tabla 4.2. Óxido de calcio (%) vs w (%)

Muestra / % de CaO	S-1 w (%)	M-1 w (%)	M-2 w (%)
0	124.44	80.40	44.40
5	102.48	78.20	31.50
10	92.31	69.20	27.30
15	76.69	59.10	21.40
20	65.04	50.80	17.70
25	46.67	45.10	---

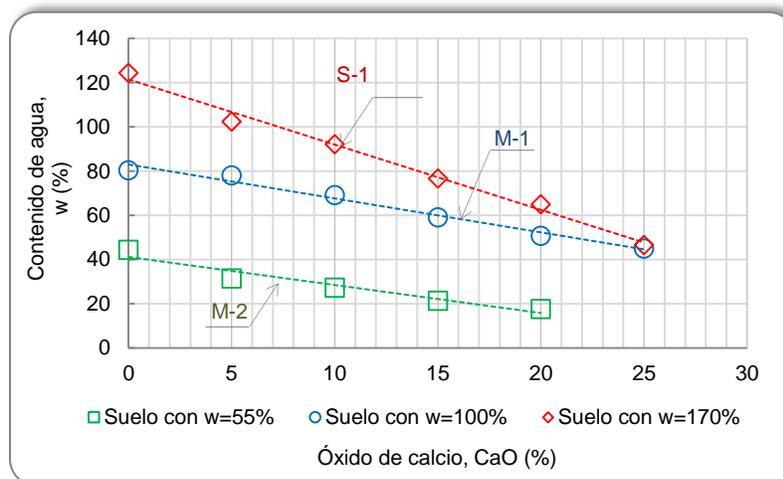


Figura 4.5. Variación del w (%) con el CaO adicionado (%)

4.5.1. Curvas de compactación para porcentajes de CaO variables o “Curva por deshidratación química”.

La denominación de “Curva por deshidratación química” se consideró debido a la representatividad teórica de los resultados que se pueden reproducir en campo en función del incremento del porcentaje en peso del CaO, “Tabla 4.3”. Lo anterior permitirá definir e interpretar la tendencia de la variable CaO y sus efectos sobre el comportamiento de las variables γ_d y $w\%$, (Figura 4.6) considerando únicamente el efecto de secado inducido por la variable CaO posterior a la primera hora de su mezclado.

Tabla 4.3. Parámetros de compactación “Curva por deshidratación química”

Muestra	CaO (%)	Gs (---)	w (%)	γ_d		e (---)
				(t/m ³)	(kN/m ³)	
S-1	0	2.72	124.44	0.60	5.97	3.56
	5	2.73	102.48	0.70	6.95	2.93
	10	2.59	92.31	0.75	7.54	2.44
	15	2.46	76.69	0.84	8.42	1.92
	20	2.49	65.04	0.94	9.38	1.65
	25	2.31	46.67	1.07	10.72	1.15
M-1	0	2.85	80.38	0.81	8.08	2.53
	5	2.74	78.23	0.85	8.48	2.23
	10	2.72	69.17	0.93	9.26	1.94
	15	2.67	59.12	1.02	10.16	1.63
	20	2.57	50.81	1.10	11.04	1.33
	25	2.59	45.12	1.17	11.67	1.22
M-2	0	2.63	49.11	1.13	11.31	1.32
	5	2.69	40.97	1.23	12.28	1.19
	10	2.56	33.50	1.30	13.00	0.97
	15	2.54	26.83	1.24	12.40	1.05
	20	2.47	22.12	1.21	12.10	1.04

1 (t/m³) ~ 10 (kN/m³) y $\gamma_w = 1$ (t/m³)

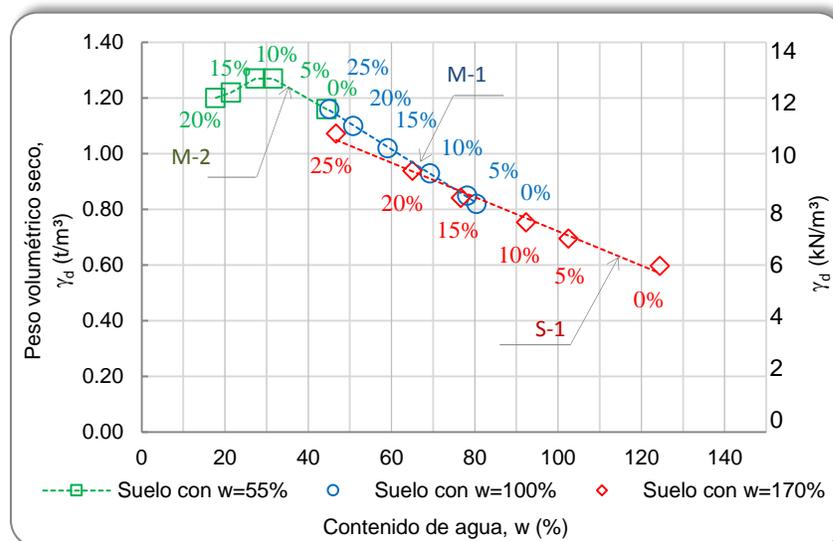


Figura 4.6. Curvas de compactación para porcentajes variables de CaO, “Curva por deshidratación química”

En la “Figura 4.6” se puede observar la tendencia lineal ascendente del γ_d con el incremento del CaO induciendo el decremento del $w\%$, para el caso de las muestras S-1 y M-1, lo cual es consistente con lo descrito en el inciso 4.3; sin embargo, no se obtiene un quiebre que defina una humedad óptima a menos que se incrementen los porcentajes adicionados y cuyo estudio no se consideró viable para los alcances de

la investigación debido a los altos porcentajes de CaO requeridos para secar las muestras además del incremento en costo que involucra su empleo en la construcción. La muestra M-2 presenta comportamiento no lineal (quiebre) con porcentajes de CaO elevados (mayores a 15%). Este último comportamiento se puede adjudicar a la baja cantidad de agua disponible ($w = 55\%$) para lograr la hidratación del elevado porcentaje de CaO. Esto se observó en laboratorio como una mezcla no homogénea en la que físicamente se distinguían cambios en la tonalidad entre los materiales mezclados, CaO y suelo. Ante tal efecto cualquier incremento del porcentaje de CaO generó una disminución del γ_d (rama seca), consecuentemente se consideró razonable desistir de tales porcentajes de CaO (15, 20 y 25%) para el caso particular de la muestra M-2.

Ante los resultados obtenidos fue necesario involucrar la variable tiempo de fraguado, permitiendo que los efectos de secado del CaO continúen antes de iniciar la compactación.

En las curvas que se muestran en el siguiente inciso se complementan con la curva particular de cero aire y cero vacíos para cada muestra de suelo en particular, además de las curvas mostradas en la “Figura 4.6”.

4.5.2. Curvas de compactación para porcentajes de CaO constantes, “Curva por deshidratación química y secado ambiente”.

En las “Figuras 4.7 a 4.9” se presentan las curvas de compactación particulares correspondientes a la muestra de suelo S-1 adicionada con 10, 15 y 20% de CaO (Tabla 4.4 a Tabla 4.6), donde se presenta también la “Curva de compactación por deshidratación química” correspondiente y la curva de saturación para $S_r = 100\%$.

Las curvas de compactación correspondientes a porcentajes constantes de CaO adicionados permiten obtener la humedad óptima ($w_{\text{ópt}}$) en laboratorio para cada mezcla analizada la cual sirve como curva patrón para garantiza un grado de compactación adecuado en campo. La relación que existe entre la “Curva por deshidratación química y secado ambiente” y la “Curva por deshidratación química” (inciso 4.5.1), es la proximidad entre el $w\%$ obtenido en campo y el $w_{\text{ópt}}$ obtenido en laboratorio, lo que garantizará un grado de compactación adecuado, o menos alejado de los resultados obtenidos en laboratorio. En las diferentes curvas de compactación mostradas a continuación para las distintas probetas de suelo analizadas se muestra de forma gráfica (zona sombreada) la relación mencionada anteriormente.

Tabla 4.4. Parámetros de compactación muestra S-1 con 10% de CaO

CaO (%)	Punto N°	w (%)	γ_d		e (---)
			(t/m ³)	(kN/m ³)	
10	1	99.64	0.71	7.12	2.64
	2	89.31	0.76	7.64	2.39
	3	88.00	0.78	7.78	2.33
	4	73.91	0.83	8.28	2.13
	5	57.65	0.84	8.40	2.08
	6	60.00	0.85	8.52	2.04

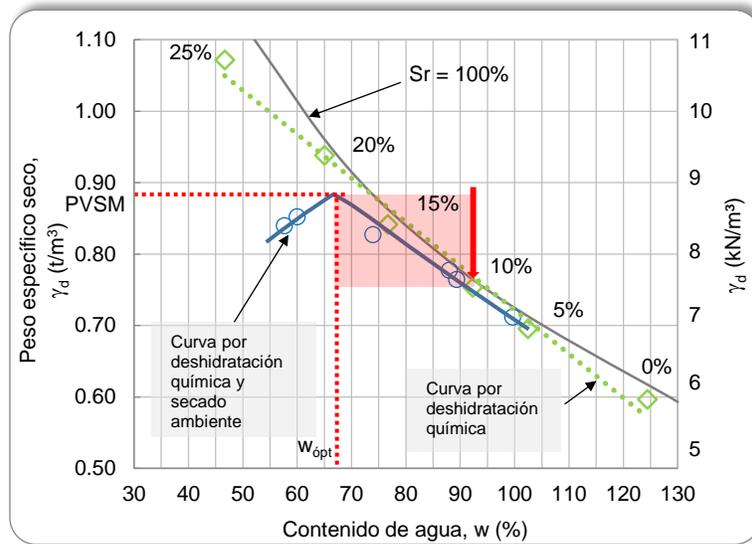


Figura 4.7. Curva de compactación, muestra S-1 y 10% de CaO

Tabla 4.5. Parámetros de compactación muestra S-1 con 15% de CaO

CaO (%)	Punto N°	w (%)	γ _d		e (---)
			(t/m ³)	(kN/m ³)	
15	1	105.18	0.67	6.70	2.67
	2	85.08	0.78	7.81	2.15
	3	82.29	0.80	8.03	2.06
	4	75.41	0.85	8.50	1.89
	5	58.98	0.94	9.45	1.60
	6	50.00	0.87	8.73	1.82

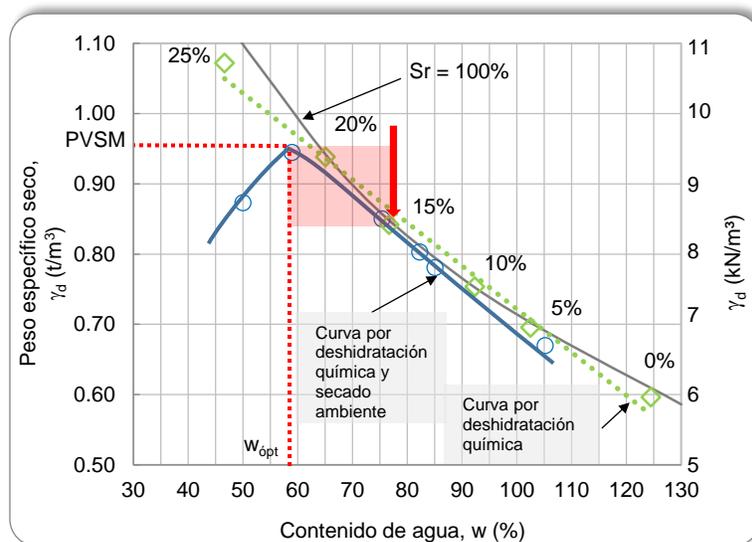


Figura 4.8. Curva de compactación, muestra S-1 y 15% de CaO

Tabla 4.6. Parámetros de compactación muestra S-1 con 20% de CaO

CaO (%)	Punto N°	w (%)	γ_d		e (---)
			(t/m ³)	(kN/m ³)	
20	1	77.32	0.83	8.33	1.99
	2	70.21	0.89	8.92	1.79
	3	62.73	0.94	9.39	1.65
	4	50.00	0.97	9.72	1.56
	5	39.62	0.92	9.16	1.72
	6	42.96	0.93	9.26	1.69

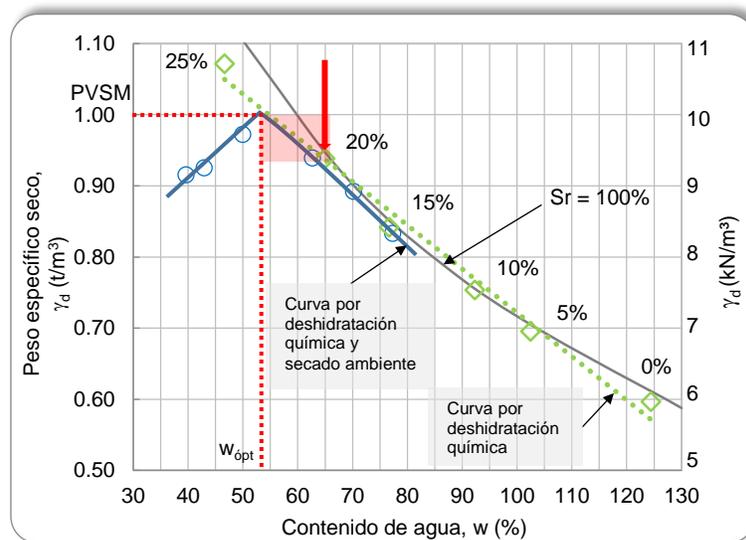


Figura 4.9. Curva de compactación, muestra S-1 y 20% de CaO

En las “Figuras 4.10 a 4.12” se presentan las curvas de compactación particulares correspondientes a la muestra de suelo M-1 adicionada con 10, 15 y 20% de CaO (Tabla 4.7 a Tabla 4.9), donde se muestran también la “Curva de compactación por deshidratación química” correspondiente y la curva de saturación para $S_r = 100\%$.

Tabla 4.7. Parámetros de compactación muestra M-1 con 10% de CaO

CaO (%)	Punto N°	w (%)	γ_d		e (---)
			(t/m ³)	(kN/m ³)	
10	1	33.88	0.71	7.06	2.85
	2	48.82	0.83	8.31	2.27
	3	61.67	1.00	9.99	1.72
	4	70.26	0.92	9.18	1.96
	5	80.50	0.86	8.61	2.16
	6	60.64	0.83	8.35	2.26

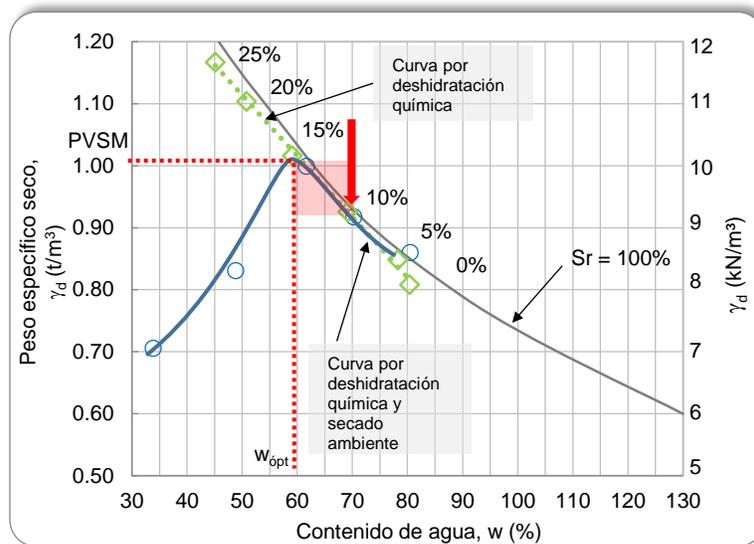


Figura 4.10. Curva de compactación, muestra M-1 y 10% de CaO

Tabla 4.8. Parámetros de compactación muestra M-1 con 15% de CaO

CaO (%)	Punto N°	w (%)	γ _d		e (---)
			(t/m ³)	(kN/m ³)	
15	1	52.59	0.97	9.67	1.76
	2	1.01	1.01	10.09	1.65
	3	0.95	0.95	9.52	1.80
	4	0.87	0.87	8.72	2.06
	5	0.86	0.86	8.56	2.12

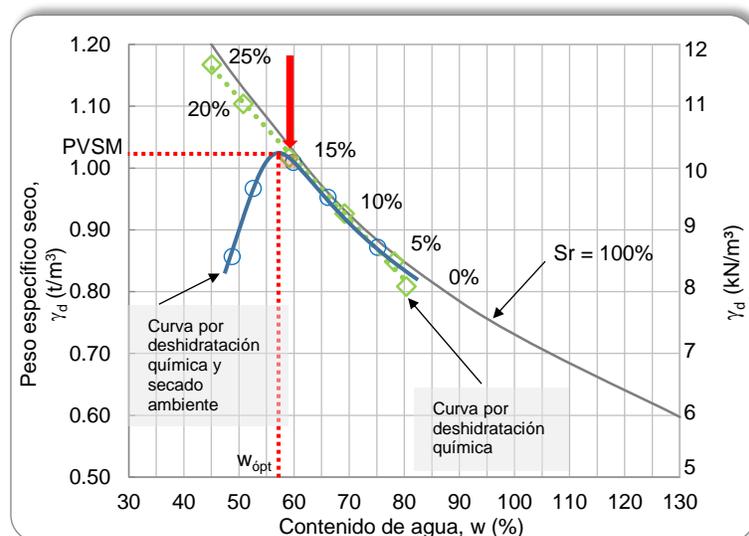


Figura 4.11. Curva de compactación, muestra M-1 y 15% de CaO

Tabla 4.9. Parámetros de compactación muestra M-1 con 20% de CaO

CaO (%)	Punto N°	w (%)	γ_d		e (---)
			(t/m ³)	(kN/m ³)	
20	1	32.60	0.96	9.63	1.67
	2	35.86	1.02	10.15	1.53
	3	44.98	1.15	11.49	1.24
	4	55.93	1.05	10.46	1.46
	5	70.88	0.90	8.97	1.87
	6	43.56	0.84	8.43	2.05

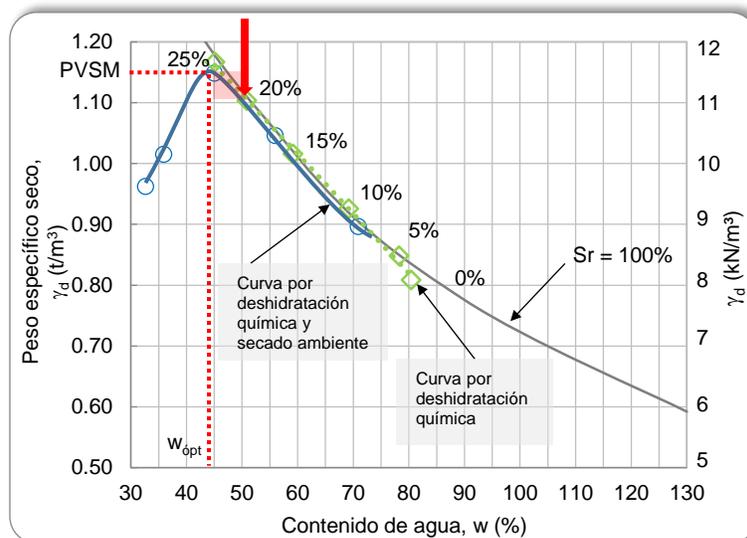


Figura 4.12. Curva de compactación, muestra M-1 y 20% de CaO

En las “Figuras 4.13 a 4.14” se presentan las curvas de compactación particulares correspondientes a la muestra de suelo M-2 adicionada con 5 y 10% de CaO (Tabla 4.10 a Tabla 4.11), donde se presenta también la “Curva de compactación por deshidratación química” y la curva de saturación para $S_r = 100\%$.

Tabla 4.10. Parámetros de compactación muestra M-2 con 5% de CaO

CaO (%)	Punto N°	w (%)	γ_d		e (---)
			(t/m ³)	(kN/m ³)	
5	1	22.47	1.34	13.39	1.46
	2	32.05	1.50	14.96	1.37
	3	40.97	1.73	17.28	1.19
	4	55.05	1.63	16.32	1.55
	5	65.29	1.58	15.79	1.82

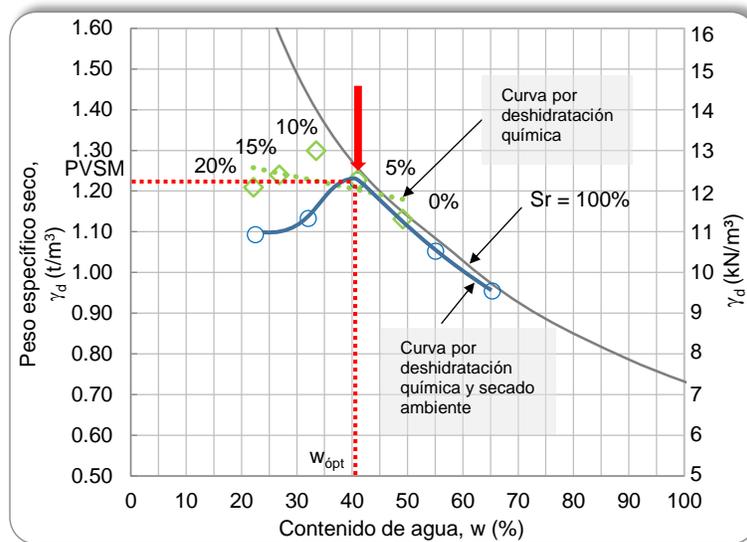


Figura 4.13. Curva de compactación, muestra M-2 y 5% de CaO

Tabla 4.11. Parámetros de compactación muestra M-2 con 10% de CaO

CaO (%)	Punto N°	w (%)	γ_d		e (---)
			(t/m^3)	(kN/m^3)	
10	1	14.69	1.19	11.91	1.15
	2	25.81	1.27	12.72	1.01
	3	33.50	1.29	12.95	0.98
	4	43.79	1.19	11.89	1.15
	5	54.40	0.95	9.53	1.69

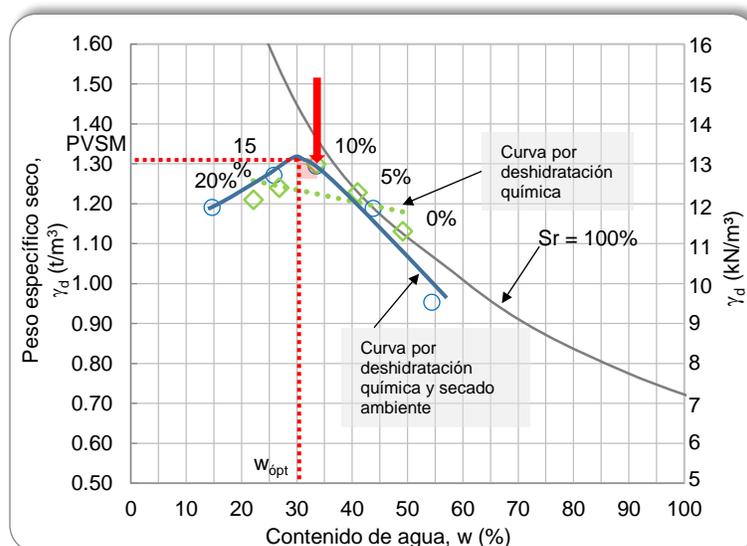


Figura 4.14. Curva de compactación, muestra M-2 y 10% de CaO

4.6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio, se evidencia la disminución de la humedad de las muestras de suelo analizadas por efectos de la adición del porcentaje en peso del CaO.

Las variables analizadas en este capítulo son: % CaO, $w\%$, γ_d , $w_{\text{ópt}}$ y PVSM.

Los resultados del inciso 4.5, indican que a mayor porcentaje de CaO mayor es la reducción del contenido de agua de las muestras, con tasas de reducción en promedio del orden de -3.0, -1.5 y -1.3 para las muestras S-1, M-1 y M-2 respectivamente.

Para los resultados obtenidos en los incisos 4.5.1 y 4.5.2. La relación que existe entre la “Curva por deshidratación química” (inciso 4.5.1) y la “Curva por deshidratación química y secado ambiente” (inciso 4.5.2), es la proximidad entre el $w\%$ obtenido en campo y el $w_{\text{ópt}}$, lo que garantizará un grado de compactación adecuado desde el punto de vista geotécnico. En las “Figuras 4.7 a 4.14”, se muestra de forma gráfica la relación mencionada anteriormente identificada por la zona sombreada, a menor área mayor es la proximidad al $w_{\text{ópt}}$. En general dicha consideración genera una mayor proximidad al $w_{\text{ópt}}$ si se adicionan mayores porcentajes de CaO (debido a los efectos de secado que propician que los materiales sean trabajables y que permitan su compactación), sin embargo, por motivos económicos que no son tratados en la presente investigación, se considera viable evaluar el comportamiento mecánico con los porcentajes recomendados a continuación. Los porcentajes de CaO seleccionados de acuerdo a las curvas de compactación presentadas son, 15, 15 y 5% para las muestras S-1, M-1 y M-2, respectivamente, “Tabla 4.12”.

Tabla 4.12. Porcentajes de CaO óptimos recomendados

Muestra	CaO (%)	Gs (-)	W _{ópt} (%)	PVSM	
				(t/m ³)	(kN/m ³)
S-1	10	2.59	66.00	0.88	8.80
	15*	2.46	59.00	0.94	9.40
	20	2.49	53.00	1.00	10.00
M-1	10	2.72	62.00	1.00	10.00
	15*	2.67	57.50	1.01	10.10
	20	2.57	44.00	1.15	11.50
M-2	5*	2.69	41.00	1.23	12.30
	10	2.56	31.00	1.31	13.10

* Recomendado como % de CaO óptimo.

Como parte de los objetivos principales de este capítulo se definió el porcentaje de CaO necesario para lograr un grado de compactación adecuado desde el punto de vista geotécnico. Se debe aclarar que para que ocurra la estabilización del suelo se debe presentar la condición química que permita tal efecto, misma que se estudia en el “CAPÍTULO 5”.

Hasta el momento se han analizado los efectos de secado provocados por la adición de CaO sobre las muestras de suelo en condiciones a corto plazo considerando los tiempos de construcción en los cuales la modificación de los materiales permite su trabajabilidad y colocación en sitio. En el siguiente capítulo se analizará la “Estabilización” de las mezclas y su comportamiento a mediano plazo.

CAPÍTULO 5

PRUEBA QUÍMICA EADES & GRIM Y DE RX

5. PRUEBA QUÍMICA EADES & GRIM Y DE RX

Se presenta la descripción general, el objetivo y la metodología empleada para determinar el porcentaje de CaO necesario para estabilizar las muestras de suelo analizadas, con base en la prueba de laboratorio Eades & Grim. Definidos los porcentajes de CaO necesarios para lograr la estabilización desde el punto de vista químico, se comparan con los resultados obtenidos en el “CAPÍTULO 4” y se concluye su aplicabilidad como solución a la problemática del NAICM.

Adicionalmente, como complemento al capítulo, se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de análisis químico por Fluorescencia de rayos X de elementos mayores y los resultados del análisis por Difracción de rayos X (DRX).

5.1. NORMATIVIDAD

El procedimiento de laboratorio empleado en la definición del porcentaje de CaO para estabilizar las muestras de suelo analizadas se basan en la siguiente normatividad.

- ASMT D-6276. Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization.

5.2. GENERALIDADES

Las reacciones básicas que se generan por efectos de la estabilización con CaO se tratan en el “CAPÍTULO 2”. Como son los efectos a corto plazo, reacciones rápidas que originan cambios físico-químicos (intercambio catiónico, floculación, aglomeración) y los efectos a largo plazo (la reacción puzolánica).

Los efectos a largo plazo se miden con base al procedimiento de Eades & Grim (1966). Procedimiento químico de laboratorio, útil y de fácil ejecución que consiste en estudiar la variación del pH para diferentes porcentajes de CaO, “Figura 5.1”. El procedimiento se basa en la determinación de la cantidad óptima o mínima de cal necesaria para estabilizar un suelo y garantizar el incremento y subsistencia de un elevado pH que garantice el desarrollo de las reacciones puzolánicas. Según con el procedimiento normado en la ASTM D-6276 [23] se deben ensayar muestras con diferentes porcentajes de CaO en las que se determina su pH en determinadas condiciones. Con base en las distintas referencias citadas en la investigación, el CaO óptimo corresponde al porcentaje para el cual se logra alcanzar el valor de pH igual a 12.4, para una temperatura de 25 °C, Figura 5.2 [21].

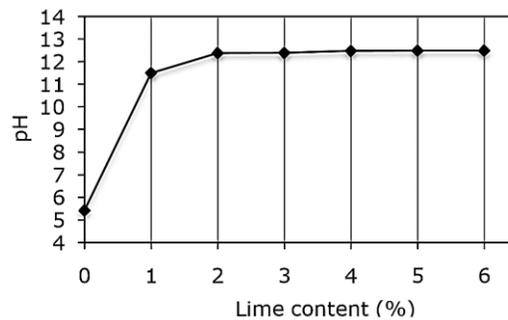


Figura 5.1. Determinación del consumo inicial de cal, [20]

La variación en la temperatura afecta la determinación del pH y solubilidad del CaO, con las variaciones siguientes, el pH disminuye a medida que incrementa la temperatura en la determinación, “Tabla 5.1”. Por otro lado, la solubilidad de la cal disminuye a medida que la temperatura aumenta, “Tabla 5.2”, [21].

La corrección por temperatura vs pH se puede estimar mediante la siguiente expresión:

$$pH_{\text{corrección}} = \left[0.03 \frac{1.0 \text{ unidad pH}}{1.0 \text{ }^\circ\text{C}} \right] * [^\circ\text{C} - 25] \quad (5.1)$$

Donde:

$pH_{\text{corrección}}$ = Indica que para cada diferencia de un grado entre la temperatura medida en $^\circ\text{C}$ y $25 \text{ }^\circ\text{C}$, hay un cambio en el pH de 0,03 unidades.

$^\circ\text{C}$ = Temperatura medida; $^\circ\text{C}$.

$$pH_{\text{corregido}} = pH_{\text{medido}} - pH_{\text{corrección}} \quad (5.2)$$

Tabla 5.1. Temperatura vs pH de una solución saturada de hidróxido de calcio

Temperatura $^\circ\text{C}$	pH
0	13.423
5	13.207
10	13.003
15	12.810
20	12.627
25	12.454
30	12.289
35	12.133
40	11.984
45	11.841
50	11.705
55	11.574
60	11.449

La solución y la suspensión resultante de la cal hidratada son fuertemente alcalinas, manteniendo un alto nivel de pH de 12,4.

Tabla 5.2. Solubilidad de hidróxido de calcio en agua

Temperatura °C	CaO g	Ca(OH) ₂ g
0	0.140	0.185
10	0.133	0.176
20	0.125	0.165
25	0.120	0.159
30	0.116	0.153
40	0.106	0.140
50	0.097	0.128
60	0.088	0.116
70	0.079	0.104
80	0.070	0.092
90	0.061	0.081
100	0.054	0.071

Gramos por 100 gramos de solución saturada, [21].

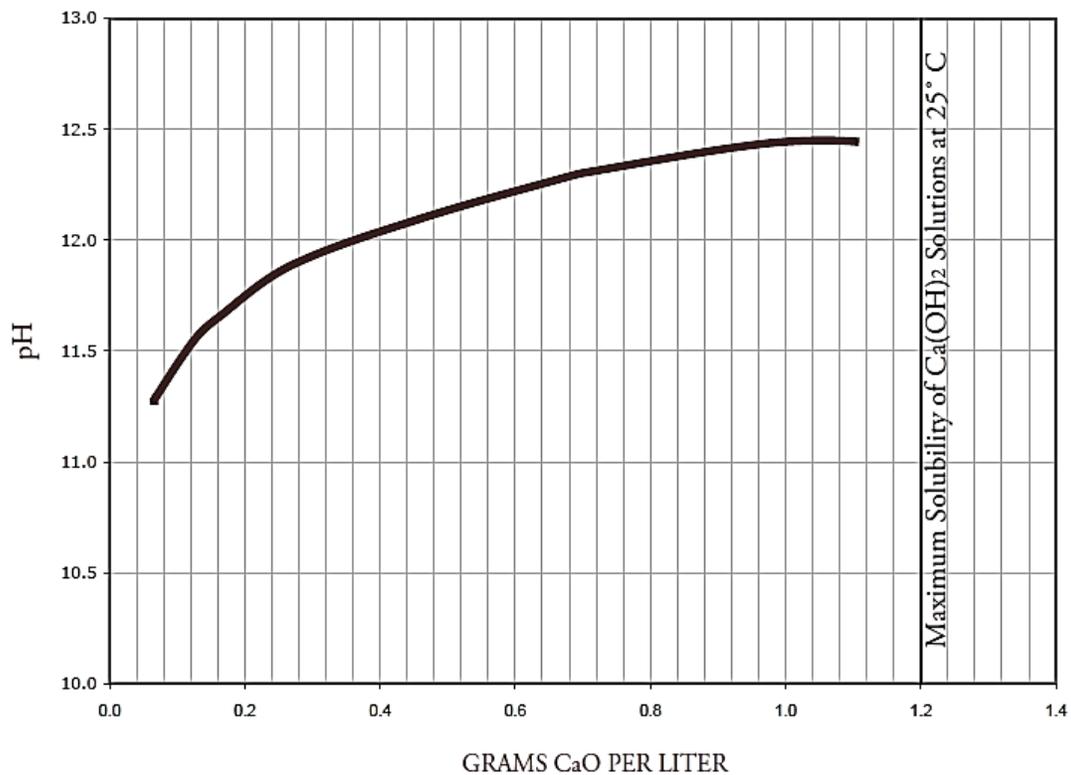


Figura 5.2. Curva del pH de las soluciones del hidróxido de calcio a 25 °C, [21]

En diversos países, las experiencias que hasta ahora se tienen sobre la estabilización de suelos, permiten considerar que el porcentaje de cal necesario para estabilizar los materiales finos con valores de $w_L < 70\%$

e IP < 40% basta con adicionar un porcentaje pequeño de cal, del orden de 2 al 5%; sin embargo, debido a las condiciones naturales de los materiales analizados presentados en el “CAPÍTULO 3” y al enfoque de la investigación, dichos porcentajes quedan fuera del estudio, por lo que se consideró entonces la aplicación de porcentajes importantes de cal para verificar su efecto sobre las arcillas del polígono del NAICM.

5.3. DEFINICIONES

Modificación. Se refiere a los cambios en las propiedades geotécnicas de los materiales a corto plazo o inmediatos debido a la adición de cal y a la reducción de la humedad del suelo, lo que mejora su trabajabilidad. Las partículas de arcilla se aglomeran en elementos desmenuzables de mayor tamaño.

Estabilización. Se refiere a los cambios en las propiedades geotécnicas de los materiales, a largo plazo debidos a la cementación.

Solubilidad. Es la capacidad de una sustancia para disolverse en otra. La sustancia que se disuelve se conoce como soluto, mientras que aquella en la cual éste se disuelve recibe el nombre de solvente. Puede ser expresada en porcentaje de soluto o en unidades como moles por litro o gramos por litro. Es importante destacar que no todas las sustancias se disuelven en los mismos solventes. La concentración es la relación existente entre la cantidad de soluto y la cantidad de disolvente en una disolución.

pH. Es una unidad de medida que sirve para establecer el nivel de acidez o alcalinidad de una sustancia. S. P. L. Sørensen (1909) definió el potencial hidrógeno (pH) como el logaritmo negativo de la concentración molar (actividad molar) base 10 en la actividad de iones de hidrógeno. Su fórmula se escribe de la siguiente manera:

$$pH = -\log_{10}[a_{H^+}] \quad (5.3)$$

Esto es lo que se determina en un medidor de pH (electrodo de vidrio), [24]. La fórmula (5.3) es útil para disoluciones que no tienen comportamientos ideales, disoluciones no diluidas. En vez de utilizar la concentración de iones hidrógeno, se emplea la actividad (a), que representa la concentración efectiva. Se considera que p es un operador logarítmico (para comprimir un intervalo de números de varias decenas de magnitud) sobre la concentración de una disolución $p = -\log[\dots]$.

La concentración de ion hidroxilo pOH, se puede definir de igual manera:

$$pOH = -\log_{10}[OH^-] \quad (5.4)$$

De tal manera que para una temperatura de 25 °C se cumple:

$$14.00 = pH + pOH \quad (5.5)$$

El pH cuenta con su propia escala, que va desde 0 a 14. El valor de 0 es indicador de máxima acidez, por otra parte, un valor de 14 es un indicador de máxima alcalinidad (bases). El punto intermedio es el 7 e indica que es neutral, “Tabla 5.3”.

Tabla 5.3. La Escala de pH

Reacción	pH	[H ⁺] $\times 10^7$	[OH ⁻] $\times 10^7$	pOH	Ejemplo
Ácida	0	1	1.E-14	14	Ácido sulfúrico concentrado
	1	1.E-01	1.E-13	13	Ácido. Clorhídrico
	2	1.E-02	1.E-12	12	Jugo de Limón, Jugo gástrico
	3	1.E-03	1.E-11	11	Jugo de Naranja
	4	1.E-04	1.E-10	10	Lluvia ácida
	5	1.E-05	1.E-09	9	Café negro
Neutra	6	1.E-06	1.E-08	8	Orina, saliva
	7	1.E-07	1.E-07	7	Agua pura
Básica	8	1.E-08	1.E-06	6	Agua de mar
	9	1.E-09	1.E-05	5	Polvo de hornear
	10	1.E-10	1.E-04	4	Leche de magnesia
	11	1.E-11	1.E-03	3	Limpiadores caseros
	12	1.E-12	1.E-02	2	Agua de jabón
	13	1.E-13	1.E-01	1	Limpiadores de hornos
	14	1.E-14	1	0	Sosa cáustica

Ácidos, Bases, pH y Soluciones Reguladoras, [25].

FRX. La fluorescencia de rayos X es una técnica espectroscópica que utiliza la emisión secundaria generada al excitar una muestra con una fuente de radiación X. La radiación X incidente o primaria expulsa electrones de capas interiores del átomo. Los electrones de capas más externas ocupan los lugares vacantes y el exceso energético resultante de esta transición se disipa en forma de fotones, radiación X fluorescente o secundaria con una longitud de onda característica que depende del gradiente energético entre los orbitales electrónicos implicados y una intensidad directamente relacionada con la concentración del elemento en la muestra. La FRX tiene como finalidad principal el análisis químico elemental, tanto cualitativo como cuantitativo de los elementos comprendidos entre el flúor (F) y el uranio (U) de muestras sólidas (filtros, metales, rocas, muestras en polvo, tejidos, etc.) y líquidas porque permite hacerlos sin preparación de la muestra.

DRX. El análisis de Difracción de Rayos X general para la identificación de fase/composición distingue los compuestos mayores, menores y de traza presentes en una muestra. Los resultados comúnmente incluyen el nombre (común) de la sustancia, su fórmula química, sistema cristalino, y número de patrón de referencia de la Base de Datos ICDD (Centro Internacional de Datos de Difracción). El análisis DRX general para la identificación de fase/composición y la fluorescencia de rayos X en general, consiste en análisis complementarios, los cuales proporcionan información sobre las composiciones, fases químicas y estructuras cristalinas presentes en la muestra. Entre otros aspectos sirve para la identificación del tipo de arcillas.

5.4. CONSIDERACIONES DE EJECUCIÓN Y DE ANÁLISIS

Las variantes consideradas en los materiales normados en la ASTM D-6276 para realizar las pruebas Eades & Grim en el laboratorio, se listan a continuación:

1. La sustitución del agua destilada por agua del sitio (recolectada dentro del polígono del NAICM). Esta modificación particular permite reproducir los efectos reales en el campo.
2. La modificación en los porcentajes de CaO investigados, 5, 10, 15, 20 y 25%.

5.5. TRABAJOS DE LABORATORIO

5.5.1. Prueba Eades & Grim para las tres muestras analizadas.

Se ensayaron las muestras S-1, M-1 y M-2 con distintos porcentajes de CaO en incrementos porcentuales de 5% midiéndose el pH según la normatividad y con las consideraciones expuestas en el inciso 5.4, para conocer el porcentaje de CaO óptimo con el cual se logra estabilizar químicamente a los materiales analizados.

El análisis fue realizado con un medidor de pH portátil modelo 3D CORNING, electrodo Sensorex con intervalo de 0 a 14.

En las “Figuras 5.3 a 5.5” se presentan los resultados de la determinación del pH.

El comportamiento asintótico de las curvas de pH vs % CaO se logra para porcentajes de CaO elevados, en comparación con las diversas referencias en las que se señala que la estabilización y el comportamiento asintótico se logran para porcentajes de CaO entre 3 y 5%, para un pH igual al 12.4, (inciso 5.2). Si bien es cierto que la estabilización se logra para el pH mencionado, los resultados obtenidos indican que con la adición de 3 a 5% se logra la estabilización, pero no así, el comportamiento asintótico. Lo anterior se puede interpretar como porcentajes frontera entre el punto en el cual se logra la estabilización y el punto correspondiente al porcentaje máximo para el cual cualquier adición de CaO ya no representaría cambios en las muestras analizadas, es decir, que los porcentajes de CaO intermedios permiten estabilizar y acondicionar los suelos por efectos de deshidratación de los mismos permitiendo su acondicionamiento y trabajabilidad en campo. Este efecto se debe principalmente a las condiciones naturales en que se encuentran inmerso el subsuelo del de Texcoco, donde el pH del agua de sitio es igual a 11.9 y por lo tanto la adición del CaO eleva su alcalinidad.

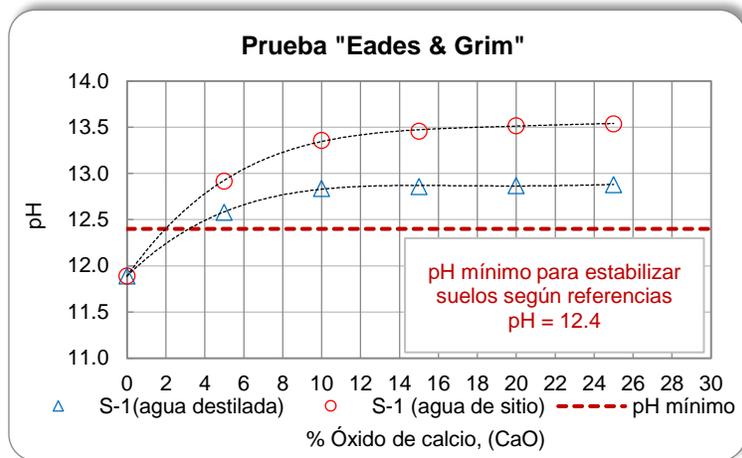


Figura 5.3. Ensayo Eades & Grim, muestra S-1

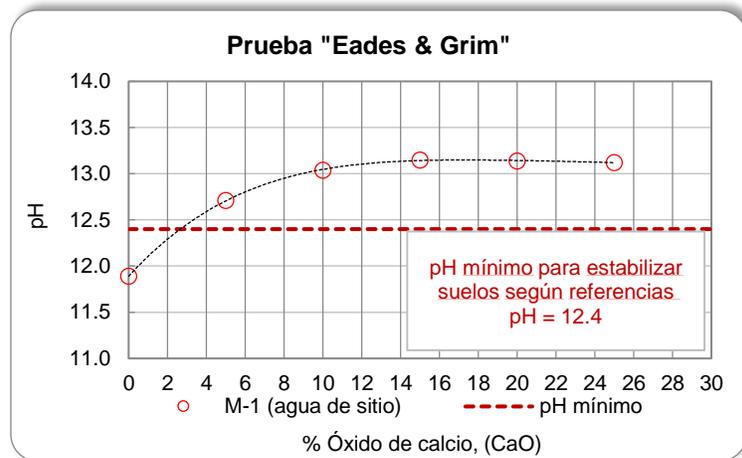


Figura 5.4. Ensayo Eades & Grim, muestra M-1

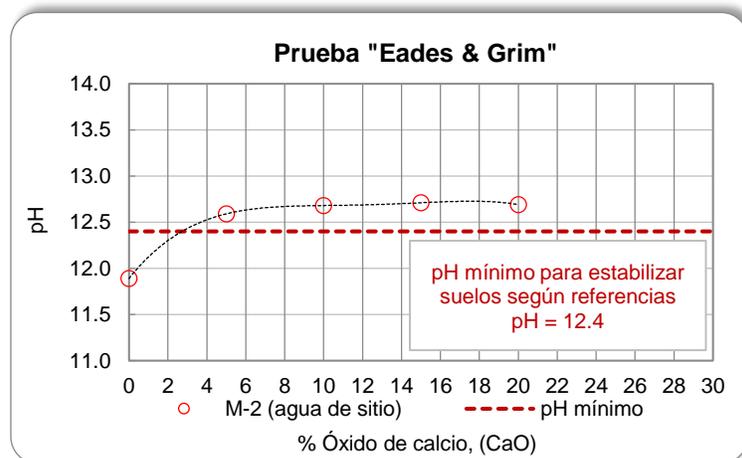


Figura 5.5. Ensayo Eades & Grim, muestra M-2

5.6. FRX

En la “Tabla 5.4” se presentan los resultados del análisis químico Cuantitativo por Fluorescencia de rayos X de elementos mayores de las tres muestras analizadas, tanto para condiciones naturales como en su mezcla con CaO. La muestra fue preparada en base seca y fundida. La Pérdida por Calcinación (P x C) se determina calcinando la muestra a 950°C durante 1 hora.

El análisis fue realizado con un espectrómetro secuencial de Fluorescencia de Rayos X RIGAKU ZSX Primus II, calibrado con muestras Internacionales de Referencia Geoquímica.

Tabla 5.4. Resultados del análisis cuantitativo por FRX

Muestra	Estado	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ t	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PxC	Suma
		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
S-1	Natural	44.03	0.52	13.29	4.14	0.05	7.82	2.44	7.09	2.80	0.15	17.81	100.14
M-1	Natural	43.93	0.73	18.42	5.88	0.06	3.65	1.64	7.20	3.29	0.16	15.02	99.98
M-2	Natural	40.70	0.47	9.94	3.47	0.06	8.70	13.03	2.42	1.67	0.19	19.11	99.76
S-1	15 % CaO	32.16	0.36	9.21	2.84	0.04	5.46	23.93	3.74	0.82	0.11	21.01	99.68
M-1	15 % CaO	38.23	0.44	9.04	3.19	0.06	7.80	18.37	2.29	1.51	0.18	18.54	99.65
M-2	5 % CaO	36.84	0.45	8.78	3.13	0.05	7.55	17.56	2.26	1.52	0.18	21.45	99.78

SiO₂: Óxido de silicio (sílice)

TiO₂: Óxido de titanio

Al₂O₃: Óxido de aluminio (alúmina)

Fe₂O₃t: Óxido de hierro

MnO: Óxido de manganeso

PxC: Pérdida por calcinación.

MgO: Óxido de magnesio

CaO: Óxido de calcio

Na₂O: Óxido de sodio

K₂O: Óxido de potasio

P₂O₅: Óxido de fósforo

En la tabla anterior se puede observar que las muestras con CaO presentan un ligero decremento de la sílice y la alúmina en comparación con los porcentajes presentes en su estado inicial o natural; sin embargo, la persistencia de estos tres óxidos representa más del 60% de la muestra total y se favorece la reacción con el calcio de CaO para la formación de silicatos cálcicos hidratados (CSH) y de aluminatos cálcicos hidratados (CAH), que son productos cementantes similares a aquellos formados por el cemento Portland y los cuales garantizan el incremento y permanencia de la resistencia en las mezclas.

5.7. DRX

La “Tabla 5.5” muestra los resultados del análisis por Difracción de Rayos X para las tres muestras del suelo analizadas en estado natural. Las muestras se colocaron húmedas en tubos para centrífuga y se lavaron con agua destilada 5 veces. Posteriormente fueron preparadas en fracciones orientadas para poder determinar el tipo de arcilla presente. Las muestras se analizaron en su condición orientada sin tratamiento, orientada glicolada y por último la orientada calcinada a 550 °C

Los tipos de arcilla mencionados en la “Tabla 5.5” se describen en los siguientes párrafos.

Esmectita. Una categoría de minerales de arcilla que tienen una estructura cristalina de tres capas (una capa de alúmina y dos capas de sílice) y con la característica común de expansión por hidratación ante la presencia de agua. La montmorillonita es un mineral de arcilla de esmectita conocido por su empleo como

fluidos en trabajos de perforación. Su forma sódica, la bentonita, es un aditivo para lodo a base de agua ampliamente utilizado.

Halloysita. Se forma generalmente por la alteración hidrotermal de minerales aluminosilicatos. Puede encontrarse mezclada o asociada con dickita, caolinita, montmorillonita y otros minerales arcillosos. Químicamente es un aluminosilicato hidroxilado. El material está constituido por aluminio (20,90%), silicio (21,76%) e hidrógeno (1,56%). Halloysita-7Å: anhidro, de fórmula $Al_2Si_2O_5(OH)_4$.

Caolinita. Un tipo de mineral de arcilla del grupo del caolín, que se forma a través de la meteorización del feldespato y de los minerales del grupo de las micas. A diferencia de ciertos minerales de arcilla, como la montmorillonita, la caolinita no tiende a contraerse o a dilatarse ante la presencia de agua. La caolinita se utiliza para fabricar papel, cerámica y ladrillos.

Tabla 5.5. Resultados del análisis cuantitativo por DRX

Muestra	Tipo de arcilla
S-1	Esmectita y Halloysita
M-1	Esmectita y Halloysita
M-2	Esmectita y Caolinita

5.8. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se evaluaron los efectos de la estabilización debidos al CaO mediante la medición del pH.

Las variables analizadas en este capítulo son: % CaO, pH, tipos de arcilla y compuestos químicos.

El rango de variación de los porcentajes de CaO implementados en la investigación tiene una variación de 5 unidades porcentuales entre sí, por lo que de requerir una mayor precisión será necesario reducir el rango de variación (cercano al valor óptimo obtenido), con lo que se podrá lograr un resultado más satisfactorio en términos económicos.

Como se puede observar en la investigación se corrobora la importancia que tiene la prueba Eades & Grim en la determinación del porcentaje óptimo de CaO necesario para la estabilización de los suelos arcillosos.

De acuerdo con los resultados indicados en las “Figuras 5.3 a 5.5” (curvas pH vs % CaO), se aprecian los porcentajes de CaO para los cuales ya no se presenta un aumento significativo del valor del pH en pruebas sucesivas, lo que indica que cualquier adición mayor de CaO ya no reacciona químicamente con el suelo y se define como valor óptimo necesario y económico para lograr la estabilización y el acondicionamiento por secado de los materiales analizados.

Como dato interesante, la curva de la “Figura 5.1” en donde el valor de pH mínimo para lograr la estabilización es del 12.4 [21] se compara con el valores del pH obtenidos para las muestras analizadas S-1, M-1 y M-2, en las cuales se logra la estabilización y el acondicionamiento para un pH del 13.5, 13.1 y 12.6 respectivamente (Tabla 5.6), se concluye entonces que dadas las condiciones y la composición de los materiales analizados, se favorece la formación de los productos cementantes que garantizan un buen comportamiento a corto y largo a largo plazo de los materiales del NAICM estabilizados con CaO.

Tabla 5.6. Corrección de pH por temperatura

Muestra	CaO %	pH*	Corrección de pH	pH
		Medido	T (23° C)	Corregido
S-1	15	13.51	-0.06	13.45
M-1	15	13.14	-0.06	13.08
M-2	5	12.69	-0.06	12.63

* Tomado como el promedio de las lecturas con variación entre ellas menor a 0.1 unidades.

La tabla anterior presenta la corrección por temperatura de del pH a 23 °C (temperatura promedio durante la determinación del pH), modificación que no genera una variación significativa del pH inicial.

Los porcentajes necesarios de CaO para estabilizar los materiales analizados indicados en la “Tabla 5.7” asisten a los porcentajes recomendados en el “CAPÍTULO 4”, lo que permite asumir las dos condiciones siguientes.

1. A corto plazo. Un proceso de compactación adecuado después de transcurrida la primera hora del mezclado del suelo-CaO.
2. A largo plazo. La estabilización de las mezclas.

Tabla 5.7. Porcentajes de CaO empleados en la investigación

Muestra	CaO %
S-1	15
M-1	15
M-2	5

De acuerdo con los puntos anteriores, si bien en el “CAPÍTULO 4” se propusieron porcentajes de CaO en función de los procesos de compactación de los materiales después de la primera hora de su mezclado, dentro de los cuales en algunos casos se requería de una mayor cantidad de CaO, se corrobora con los resultados obtenidos en el presente capítulo que los porcentajes óptimos necesarios para estabilizar los suelos arcillosos en la investigación son los presentados en la “Tabla 5.7”.

En los capítulos subsecuentes se procedió con la elaboración de las probetas necesarias de suelo-CaO en los porcentajes definidos en la “Tabla 5.7” para evaluar parámetros mecánicos y su evolución con el tiempo de curado, debido a que las reacciones puzolánicas se producen de mediano y a largo plazo.

De acuerdo con los resultados de las “Tablas 5.4 y 5.5”, se observa la abundancia de Sílice y Alúmina en los materiales analizados, tanto en condiciones naturales como en su mezcla con CaO, lo cual asegura y favorece la reacción con el calcio de la cal para formar los silicatos cálcicos hidratados (CSH) y los aluminatos cálcicos hidratados (CAH), que son productos cementantes similares a aquellos formados en el cemento Portland.

CAPÍTULO 6

PRUEBA CBR Y DE EXPANSIÓN

6. PRUEBA CBR Y DE EXPANSIÓN

Se presenta la descripción general, el objetivo y la metodología empleada para determinar la resistencia de las mezclas de suelo-CaO mediante la prueba California Bearing Ratio (CBR) y el comportamiento ante cambios volumétricos por expansión (Exp) por efecto de la sumersión de los especímenes. La ejecución de la prueba se realiza para dos condiciones, para especímenes elaborados en laboratorio y para especímenes inalterados extraídos de las plataformas de prueba (de sitio).

6.1. NORMATIVIDAD

El procedimiento de laboratorio empleado en este capítulo, se basa en la siguiente normatividad.

- ASMT D-1883. Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils.
- M MMP 1 11/08. Métodos de muestreo y pruebas de materiales. Valor Soporte de California (CBR) y Expansión (Exp) en Laboratorio.

Los procedimientos listados no se detallan, debido a que los conocimientos que se tienen de los mismos son ampliamente reconocidos y empleados en el ámbito de las vías terrestres y la geotecnia.

6.2. GENERALIDADES

La prueba de CBR fue originalmente desarrollada por el Departamento de Carreteras del Estado de California; actualmente es de uso práctico y reconocido como parámetro de diseño de terracerías y pavimentos en todo el mundo. El CBR es un índice utilizado para evaluar la resistencia al corte de los materiales de terraplén, subyacente, sub-rasante y de las capas de sub-base y base de la estructura de pavimentos. Se expresa como porcentaje de un valor de referencia o patrón. Cuanto más elevado es el CBR mayor resistencia por cortante tiene el suelo.

El ensayo se realiza normalmente sobre suelo dispuesto en el laboratorio en condiciones determinadas de humedad y densidad; sin embargo, también pueden realizarse pruebas representativas en muestras tomadas en campo.

La prueba consiste en compactar dinámicamente tres especímenes del material en estudio, con tres energías de compactación y un contenido de agua ($w\%$) igual al del material de banco a 1.5 m de profundidad (para el caso de estudio fue el $w\%$ logrado por la adición del CaO en los porcentajes definidos en el “CAPÍTULO 5”), someter a cada espécimen a la sumersión en agua destilada por un periodo de 96 h o hasta lograr la

estabilidad en los cambios por deformación volumétrica (Exp.) y posteriormente medir su resistencia a la penetración.

En las siguientes tablas se presentan las clasificaciones de los materiales recomendados por la SCT para ser empleados como parte de cuerpo de terraplén y de la estructura de los pavimentos.

Tabla 6.1. Clasificación de materiales de acuerdo con su CBR, NMX-C-416

CBR		Clasificación
0-5		muy mala
6-10	Sub-rasante	mala a dudosa
11-20		regular a buena
21-30		muy buena
31-50	Sub-base	buena calidad
51-80	Base	regular
81-100		buena

NMX-C-416 [26]

Tabla 6.2. Clasificación de materiales de acuerdo con su CBR, SCT

CBR mínimo		Clasificación
5		terraplén
10		subyacente
20	Material para:	sub-rasante
50		sub-base
80		base

IMT-SCT [31],[32],[33],[34],[35]

Es importante mencionar que en lo general las variaciones que se pueden presentar en la determinación del CBR son debidas a la textura de los suelos, su contenido de agua y la condición de compactación establecida en cada espécimen.

La prueba del CBR permite también dentro de su procedimiento la determinación de la expansión (Exp.) de los materiales [27], [29], la cual consiste en la sumersión de los especímenes y en medir su variación de altura (respecto a la altura inicial) por un cierto periodo o bien hasta lograr la estabilidad entre lecturas de deformación. La expansión se calcula en términos porcentuales respecto a la altura inicial del espécimen.

6.3. DEFINICIONES

CBR. Valor Soporte de California [27] se puede definir como la menor relación entre la presión necesaria para penetrar un vástago cilíndrico de dimensiones y a velocidad establecidas, 0.1” (2.54 mm) y 0.2” (5.08 mm) en un espécimen del material analizado y la presión necesaria para lograr la misma penetración dentro de un espécimen de material, adoptado como patrón, correspondiente a piedra triturada. El ensayo mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas.

Expansión. (Exp.) Es la relación en porcentaje del incremento de la altura de los especímenes debido a la sumersión, entre su altura inicial (original).

6.4. CONSIDERACIONES DE EJECUCIÓN Y DE ANÁLISIS

Las variantes consideradas en la ejecución de la prueba en el laboratorio se presentan a continuación:

Para especímenes elaborados en el laboratorio.

1. Compactación de las mezclas de suelo-CaO posterior a la primera hora de su mezclado.
2. Sumersión de los especímenes posterior a las 24 h de su compactación.

Para especímenes inalterados (plataformas ya construidas, ANFACAL).

1. La determinación del CBR en condiciones naturales y en condiciones de sumersión, como representación de una determinación del CBR en campo.

6.5. TRABAJOS DE LABORATORIO

6.5.1. Pruebas de mezclas elaboradas en el laboratorio.

Los trabajos de laboratorio consistieron en la elaboración de tres especímenes, según la M-MMP-1-11/08 con material suelo-CaO para cada una de las muestras de suelo analizadas. El resumen de las actividades se lista en los siguientes puntos.

- Mezclado del material suelo-CaO con el porcentaje definido en el “CAPÍTULO 5”.
- Reposo de la mezcla durante la primera hora posterior al inicio del mezclado.
- Compactación de tres especímenes por muestra con tres energías de compactación distintas [26], [27].
- Reposo del material por 24 h en molde CBR protegido contra pérdida de humedad.
- Sumersión de los especímenes por 96 h (4 días).
- Ensayo de resistencia al corte de cada espécimen.

Los resultados de laboratorio obtenidos para las muestras de suelo analizadas se presentan en las “Tablas 6.3 a 6.5”. Las “Figuras 6.1 a 6.3”, corresponden al CBR obtenido bajo las diferentes energías de compactación empleadas, donde el eje de las abscisas representa los pesos volumétricos secos (γ_d) y el de las ordenadas los valores del CBR determinados. Los puntos obtenidos se unen mediante una línea continua que no presente cambios bruscos de pendiente. Esta representación permite estimar el CBR de un material con el peso volumétrico seco correspondiente al grado de compactación (G_c) logrado en campo.

Tabla 6.3. Prueba CBR, muestra S-1 con 15% de CaO

Muestra: S-1 Golpes por capa	w (%)			γ_m		γ_d		Exp. (%)	CBR (%)
	natural	inicial	sumergido	t/m ³	kN/m ³	t/m ³	kN/m ³		
10			98.14	1.09	10.87	0.55	5.48	0.28	6.00
25	131.72	82.68	102.72	1.16	11.61	0.57	5.73	0.27	10.15
56			76.82	1.29	12.94	0.73	7.32	0.26	16.03

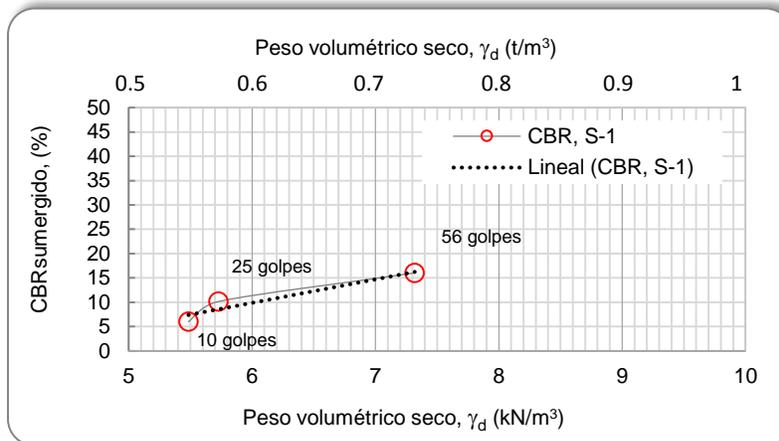


Figura 6.1. Curva γ_d vs CBR, muestra S-1 con 15% de CaO

Tabla 6.4. Prueba CBR, muestra M-1 con 15% de CaO

Muestra: M-1 Golpes por capa	w (%)			γ_m		γ_d		Exp. (%)	CBR (%)
	natural	inicial	sumergido	t/m ³	kN/m ³	t/m ³	kN/m ³		
10			93.02	1.08	10.81	0.56	5.60	0.45	6.91
25	102.13	40.90	101.56	1.13	11.32	0.56	5.62	0.50	14.56
56			81.76	1.18	11.85	0.65	6.52	0.46	24.04

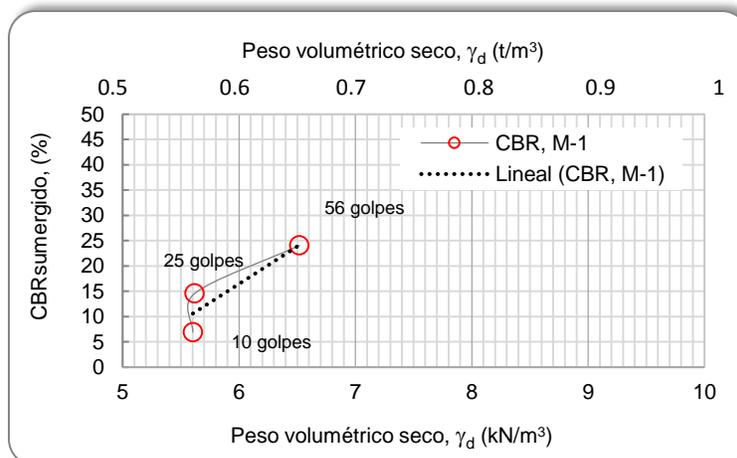
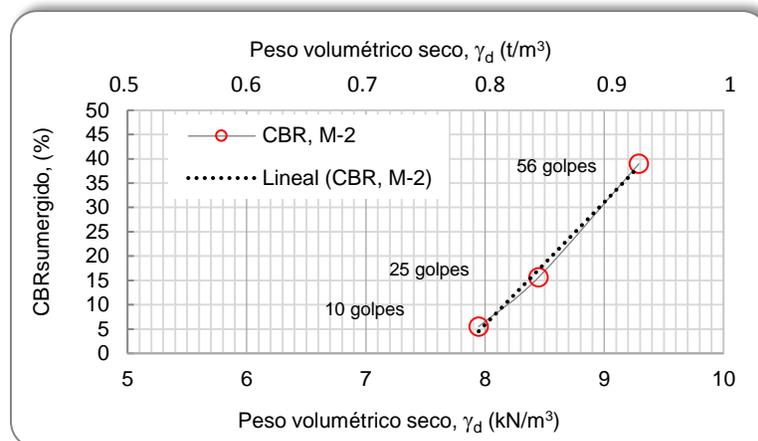


Figura 6.2. Curva γ_d vs CBR, muestra M-1 con 15% de CaO

Tabla 6.5. Prueba CBR, muestra M-2 con 5% de CaO

Muestra: M-2 Golpes por capa	w (%)			γ_m		γ_d		Exp. (%)	CBR (%)
	natural	inicial	sumergido	t/m ³	kN/m ³	t/m ³	kN/m ³		
10			68.29	1.34	13.37	0.79	7.95	0.44	5.51
25	49.73	38.49	58.49	1.34	13.39	0.84	8.45	0.44	15.66
56			48.73	1.38	13.82	0.93	9.29	0.43	38.97

Figura 6.3. Curva γ_d vs CBR, muestra M-2 con 5% de CaO

6.5.2. Pruebas de muestras inalteradas, de campo.

Los especímenes empleados para la determinación del CBR corresponden a las muestras inalteradas obtenidas de las plataformas de prueba (ANFACAL), expuestas en el “CAPÍTULO 1”.

Los trabajos de laboratorio realizados se resumen en los puntos listados a continuación:

- Preparación y labrado de dos muestras cúbicas a dimensiones del molde de ensayo CBR, para material de la “Plataforma 1”.
- Determinación del CBR en condiciones naturales (con humedad del sitio). La determinación se ejecutó para los especímenes inalterados de la “Plataforma 1” (dos especímenes) y para los especímenes de la “Plataforma 2” (tres especímenes).
- Sumersión de los especímenes en agua destilada por 96 h (4 días).
- Determinación del CBR para cada espécimen, posterior a la etapa de sumersión en agua destilada.

Los resultados de laboratorio obtenidos se presentan en las “Tablas 6.6 y 6.7”.

Es importante mencionar que la plataforma de prueba identificada como “Plataforma 1” y “Plataforma 2” se construyeron adicionando 10% de CaO en los meses de julio del 2015 y abril del 2016, el muestreo en los meses de junio y agosto del 2016, ensayadas en los meses de enero del 2017 y agosto del 2016, a edades de 19 meses y 5 meses respectivamente.

Tabla 6.6. Prueba CBR, muestra P-1 con 10% de CaO

Muestra: P-1	w (%)			γ_m		γ_d		Exp. (%)	CBR (%)	
	Espécimen	natural	inicial	sumergido	t/m ³	kN/m ³	t/m ³		kN/m ³	natural
1	71.49	71.49	89.70	1.50	15.05	0.88	8.78	0.43	51.84	36.40
2	57.07	57.07	73.77	1.59	15.92	1.01	10.14	0.18	51.47	29.04

Tabla 6.7. Prueba CBR, muestra P-2 con 10% de CaO

Muestra: P-2	w (%)			γ_m		γ_d		Exp. (%)	CBR (%)	
	Espécimen	natural	inicial	sumergido	t/m ³	kN/m ³	t/m ³		kN/m ³	natural
1	59.57	59.57	69.17	1.40	14.04	0.88	8.80	0.43	56.62	42.65
2	58.38	58.38	69.37	1.43	14.33	0.90	9.05	0.18	57.35	26.47
3	52.18	52.18	75.72	1.34	13.40	0.88	8.80	0.26	28.31	24.26

6.6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se evaluaron los efectos en la resistencia de las mezclas de suelo-CaO por efectos de la estabilización.

Las variables analizadas en este capítulo son: el CBR y la Expansión (Exp.).

De acuerdo con los resultados indicados en el inciso 6.5.1 y 6.5.2, el porcentaje de expansión bajo sumersión no supera el 0.5% en todas las pruebas, lo cual significa que está por debajo de los máximos establecidos por la normativa de infraestructura de transporte vigente de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), de 5% para materiales de terraplén (N·CMT·1·01/16), 3% para materiales de subyacente (N·CMT·1·002/02) y de 2% para subrasante (N·CMT·1·03/02).

Algunas determinaciones del CBR en suelos en condiciones naturales dentro del polígono del NAICM [28] reportan valores de CBR de 2.8 hasta 4.2% (ANFACAL), lo cual representa la baja resistencia de los materiales en estado natural y consecuentemente un mal comportamiento para su empleo en la construcción.

De acuerdo con los resultados de la muestra S-1, M-1 y M-2, (Tablas 6.3 a 6.5) se logró un incremento en el índice CBR del 260, 421 y 460%, respectivamente, para una energía de compactación de 25 golpes.

Los resultados muestran que los efectos de la estabilización mediante la aplicación de CaO en los materiales arcillosos generan una modificación permanente en el comportamiento mecánico de las mezclas reflejándose en el incremento de su resistencia (CBR), además de lograr la disminución en mayor medida de la variación volumétrica ante condiciones de sumersión (Exp.). Lo que evidencia el buen comportamiento geotécnico de las mezclas estabilizadas con CaO para las condiciones particulares de la presente investigación.

En la “Figura 6.4” se presenta la variación del CBR de las arcillas del NAICM, tanto en su condición natural como en su condición de mezcla estabilizada con CaO y se presenta la comparativa con los valores mínimos para materiales de sub-rasante de acuerdo con la SCT. Se aclara que los días de fraguado o días previos al ensaye del CBR fue de 5 días (un día por elaboración y reposo y 4 días por sumersión).

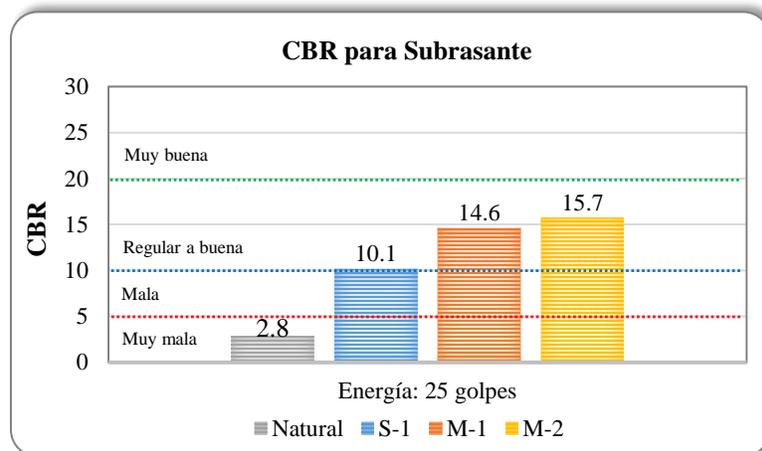


Figura 6.4. CBR de la muestra de suelo natural y las estabilizadas con CaO

En la “Figura 6.5” se presenta el efecto de la evolución de la resistencia de los materiales estabilizados con CaO. Se observa un incremento sustancial del valor del CBR para ambas plataformas, logrando clasificar las mezclas dentro de los valores aceptables para su empleo en el cuerpo de terraplén o incluso como parte de la estructura de pavimentos.

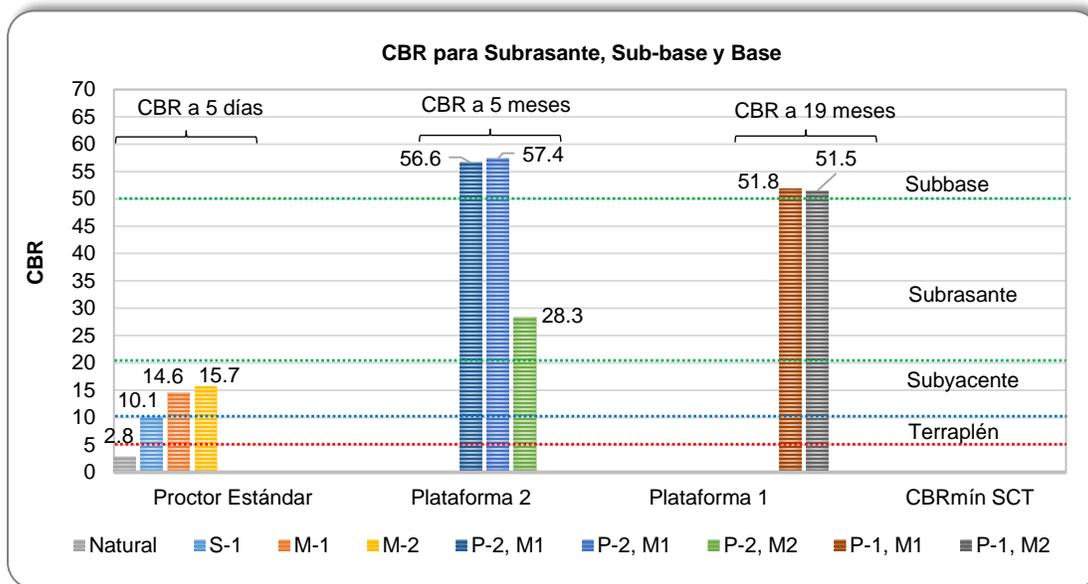


Figura 6.5. CBR de las muestras estabilizadas inalteradas (condición in-situ)

La “Figura 6.6” muestra resultados semejantes, sin embargo, se observa una reducción generalizada del CBR debido a la sumersión de los especímenes (condición más desfavorable), lo que afecta su desempeño comparado con los resultados de la “Figura 6.5” sin restar mérito a los efectos del CaO. Lo anterior, sumado a que de acuerdo con la información de construcción, [30] (ANFACAL) las plataformas de prueba P-1 y P-2 se construyeron en julio del 2015 y en abril del 2016, respectivamente, con una dosificación en peso de 10% de CaO y los especímenes elaborados en el laboratorio corresponden a un 15% de CaO para los mismos suelos con el mismo contenido de agua (S-1 con $w = 170\%$ y M-1 con $w = 100\%$) por lo cual se esperaría

tener aún una mayor resistencia si dichas plataformas de prueba se hubieran construido con la misma dosificación que las de laboratorio.

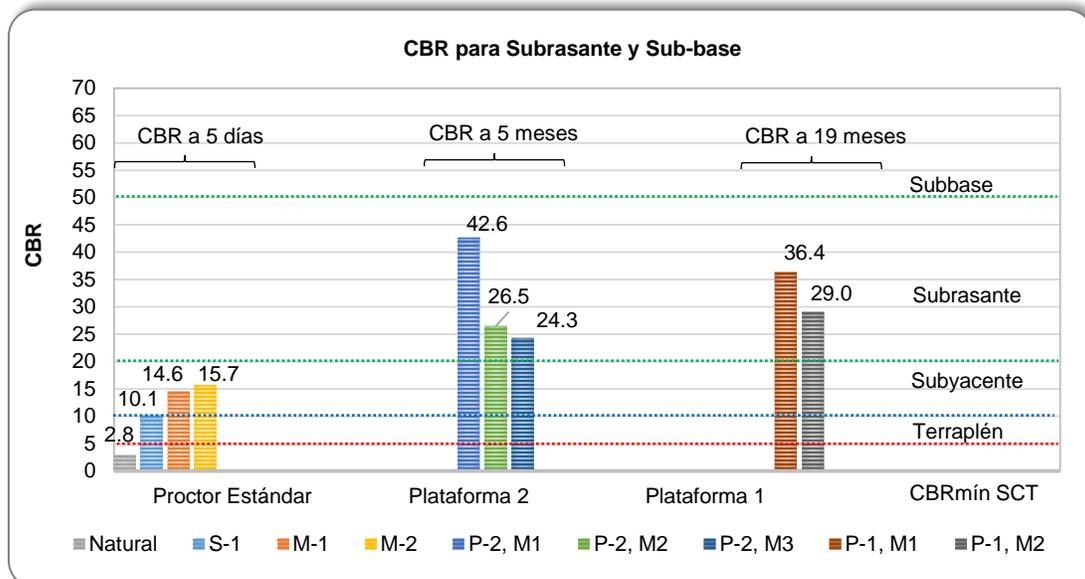


Figura 6.6. CBR de las muestras estabilizadas inalteradas (condición sumergida)

La representación gráfica presentada en las “Figuras 6.1 a 6.3”, para un suelo no estabilizado guarda un comportamiento lineal entre las energías de compactación, con o sin la variación entre las dos pendientes que resultan de la unión de los tres puntos (de energía de compactación distinta) [29]. Los resultados de la investigación reflejan una variación importante entre las pendientes obtenidas del CBR para las energías de compactación menores (10 y 25 golpes) debido a errores de ejecución de compactación principalmente; sin embargo, para efectos de medición de la resistencia en las mezclas estabilizadas con CaO en la investigación, se consideró razonable resolver dicha variación mediante la regresión lineal del comportamiento de los puntos observados.

Las curvas obtenidas en las “Figuras 6.1 a 6.3” son de utilidad en la construcción para estimar un orden de magnitud del CBR logrado en campo, es decir, con un determinado valor de γ_d de campo y la intersección de la curva de laboratorio se logra obtener el valor del CBR en el eje de las ordenadas.

CAPÍTULO 7

PRUEBAS DE RESISTENCIA DE COMPRESIÓN SIMPLE (UCS) Y DE COMPRESIÓN TRIAXIAL TIPO UU

7. PRUEBAS DE RESISTENCIA DE COMPRESIÓN SIMPLE (UCS) Y DE COMPRESIÓN TRIAXIAL TIPO UU

Se presenta la descripción general, el objetivo y la metodología empleada para determinar la resistencia de las mezclas de suelo-CaO mediante las pruebas de compresión simple (UCS) y mediante la prueba triaxial tipo no drenada no consolidada (UU). Se evalúa la evolución de la resistencia de los especímenes con el tiempo de curado (7, 14, 21, 69 días y una condición particular con 25 días de curado y 37 días sometida a secado por temperatura ambiente). La ejecución de la prueba tipo UCS se realiza para dos condiciones de trabajo, para especímenes elaborados en laboratorio y para especímenes inalterados obtenidos de las plataformas de prueba construidas por la ANFACAL (en sitio).

7.1. NORMATIVIDAD

Los procedimientos de laboratorio empleados para evaluar la resistencia de los especímenes estabilizados con CaO, se basan en la siguiente normatividad.

- ASMT D2166M. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil.
- ASMT D5102. Standard Test Methods for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures.
- ASMT D2850. Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils.

Los procedimientos listados no se detallan, debido a que los conocimientos que se tienen de los mismos, son ampliamente reconocidos y empleados en el ámbito de la geotecnia. La aplicación de la carga axial para producir una deformación axial se realizó a una velocidad de 1% por minuto.

7.2. GENERALIDADES

La prueba de compresión simple y las pruebas de tipo triaxial son de práctica común en el ámbito de la geotecnia, necesarias para el estudio de los suelos, las cuales se complementan con otro tipo de pruebas físicas y mecánicas.

La prueba de compresión simple es sencilla en su procedimiento y relativamente rápida en comparación con las pruebas triaxiales, como lo es en este caso, la prueba triaxial tipo UU. La diferencia entre ambas depende de las condiciones físicas a reproducir los tipos de suelo y los parámetros de resistencia determinados.

7.2.1. Compresión simple

La compresión simple o compresión no confinada (UCS), es un tipo especial de prueba triaxial no consolidada no drenada (UU), en la que la presión de confinamiento $\sigma_3 = 0$, [11]. Consiste en la aplicación de una carga axial (ensayo uniaxial) a una probeta cilíndrica de suelo, con relación diámetro altura determinados, sin soporte lateral y bajo condiciones no drenadas.

Mediante esta prueba se determina la resistencia a la compresión no confinada de un suelo cohesivo. La prueba se puede realizar mediante dos variantes en la aplicación de carga, por carga controlada y por deformación controlada. La primera, obteniéndose como lectura el desplazamiento sufrido por el espécimen después de cada incremento y la carga aplicada. La segunda a una velocidad de deformación determinada, obteniéndose como lectura la carga que resiste el espécimen correspondiente a un intervalo de deformación determinado y la deformación total.

Con los registros de la prueba y los procesos de cálculo necesarios, ASMT D2166 [37], se genera la curva esfuerzo vertical-deformación unitaria, donde el valor máximo del esfuerzo vertical se define como la resistencia a la compresión simple (q_u). En la “Figura 7.1” se presenta una curva típica resultante de un ensaye. La resistencia cortante de arcillas saturadas ante esta condición ($\phi = 0$) se determina con la siguiente expresión:

$$\tau = c_u = \frac{q_u}{2} \tag{7.1}$$

Donde:

c_u = Cohesión aparente, kPa

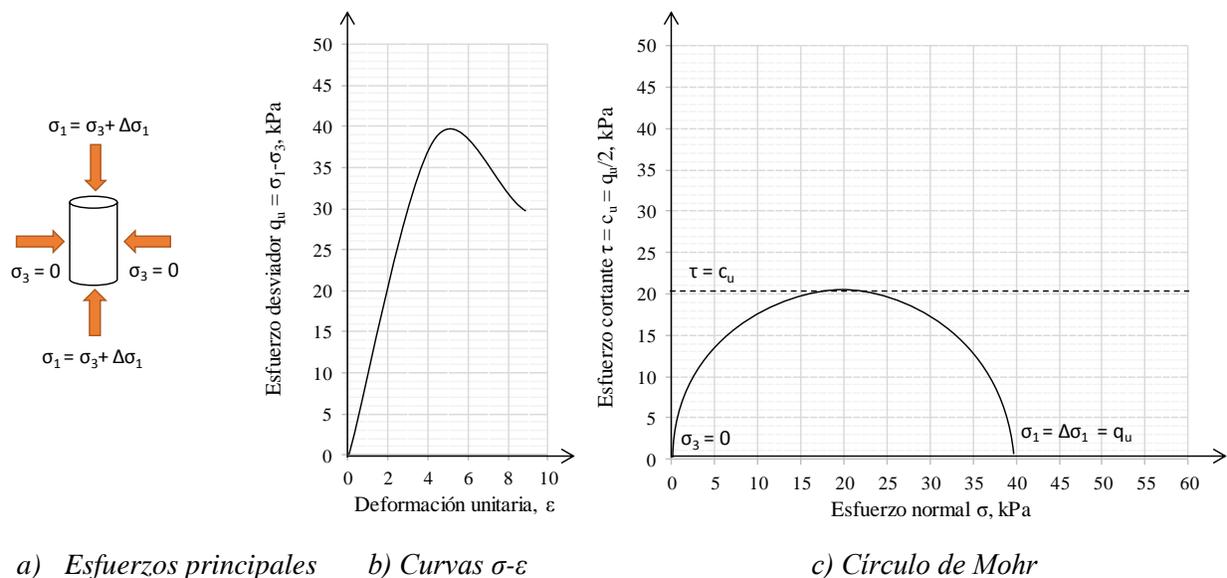


Figura 7.1. Curvas típicas de ensayos de compresión simple

7.2.2. Pruebas triaxiales

Las pruebas triaxiales a diferencia de la prueba de compresión simple, requieren de la aplicación de confinamientos laterales y axiales de diferente magnitud a un espécimen cilíndrico o probeta para estudiar su relación de esfuerzo-deformación y su resistencia al esfuerzo cortante.

Cada prueba se realiza en series de al menos tres especímenes y son aplicables a suelos cohesivos y friccionantes. Tradicionalmente se realizan en dos etapas: confinamiento y falla. La primera consiste en aplicar a la probeta una presión confinante y en la segunda se aplica a la probeta carga axial hasta llevarla a la falla.

Las pruebas triaxiales se clasifican en función de las condiciones de drenaje durante las dos etapas del ensaye, como son las No consolidadas - No drenadas (UU) o prueba rápida, en ella se impide el drenaje durante las dos etapas de la prueba, las Consolidadas - No drenadas (CU) o prueba rápida consolidada, en la que se permite el drenaje durante la primera etapa solamente y las Consolidadas - Drenadas (CD) o prueba lenta, en ella se permite el drenaje durante toda la prueba y no se permite la generación de presiones de poro aplicando las cargas con una velocidad adecuada durante la segunda etapa.

La representación de los resultados de las pruebas triaxiales se presenta en un diagrama de Mohr, el cual está constituido por una serie de círculos, cuya envolvente permite obtener los parámetros de resistencia del material estudiado en el intervalo de esfuerzos considerado.

El caso particular que se estudia en el presente capítulo es la prueba triaxial No consolidada - No drenada (UU). Esta prueba representa en términos de esfuerzos totales la condición de resistencia del suelo al final de la construcción y es aplicable a situaciones donde se asume que las cargas tendrán lugar rápidamente sin tiempo suficiente para permitir que la presión de poro inducida se disipe y que la consolidación ocurra durante el periodo de carga (análisis a corto plazo).

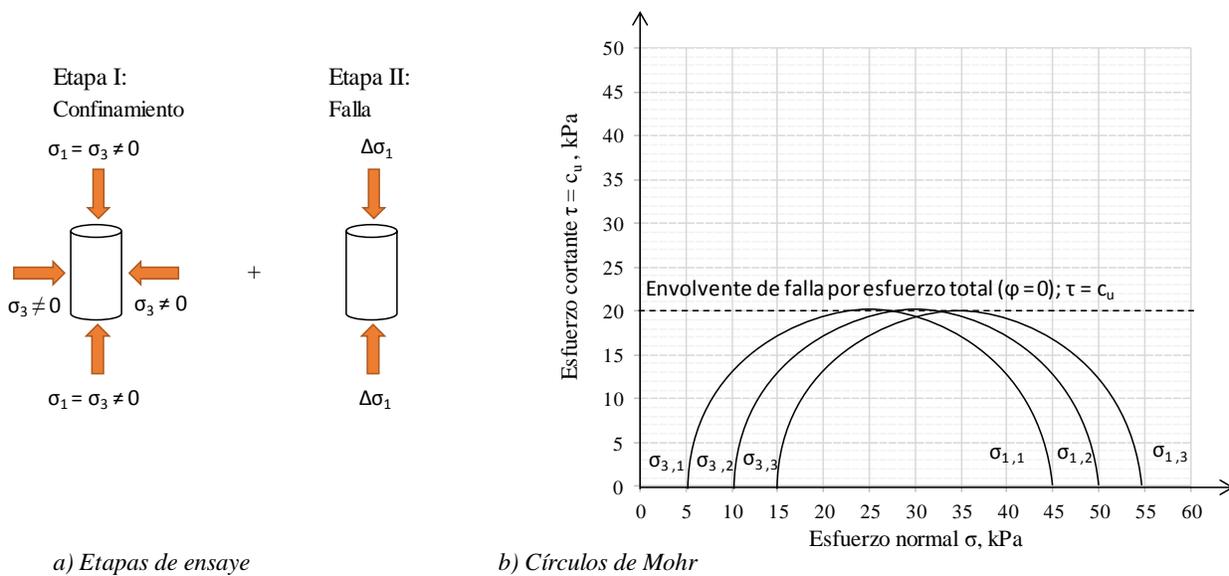


Figura 7.2. Envolvente de resistencia típica de una prueba triaxial tipo UU

En la “Figura 7.2” se presenta una envolvente típica de una prueba tipo UU en suelos saturados, sin embargo, las envolventes de resistencia tienen una forma diferente para suelos no saturados, dependiendo del grado de saturación, “Figura 7.3”.

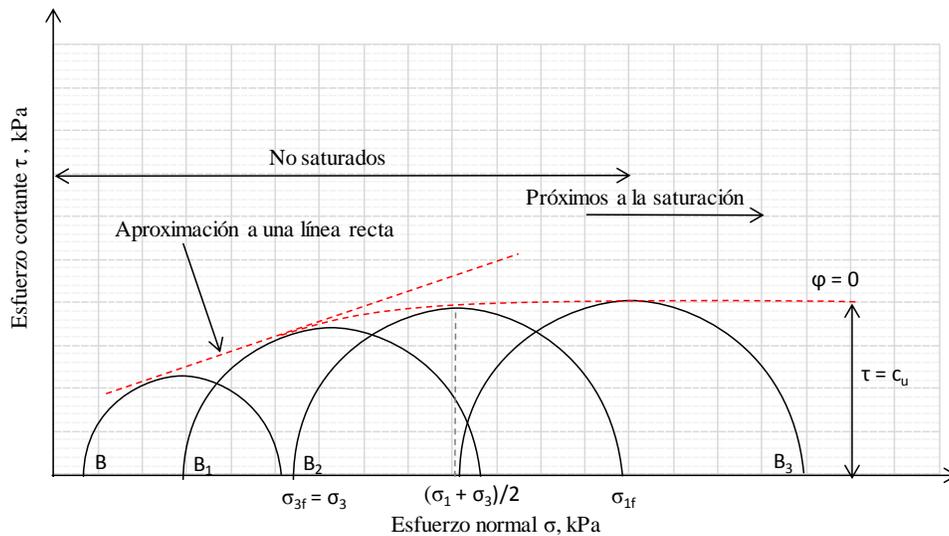


Figura 7.3. Envolvente de resistencia para suelos no saturados en prueba triaxial tipo UU

7.2.3. Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad (E_u) es la pendiente del diagrama esfuerzo-deformación unitaria ($\sigma - \varepsilon$) de una prueba de compresión en la región linealmente elástica. La curva esfuerzo-deformación unitaria ($\sigma - \varepsilon$) presenta una rama casi recta, cuya pendiente media puede representarse como una recta secante que pasa por el origen de coordenadas y corta a la curva en su punto medio, donde la ordenada correspondiente es el 50% del valor del esfuerzo desviador máximo con el cual se presenta la falla plástica de la probeta, “Figura 7.4”. Con base en lo anterior, es válido considerar entonces el comportamiento elástico (lineal) de un material ante la aplicación de cargas rápidas, por lo que se puede determinar en cada suelo, un módulo de elasticidad no drenado (E_u) según la siguiente expresión:

$$E_u = \frac{p_{d50}}{\varepsilon_{50}} \quad (7.2)$$

Donde:

E_u = Módulo de elasticidad para un suelo en condiciones no drenadas o módulo de deformabilidad sin cambio de volumen, kPa

p_{d50} = Esfuerzo desviador axial al 50% del valor máximo de la curva $\sigma - \varepsilon$, kPa

ε_{50} = Deformación axial unitaria correspondiente al p_{d50}

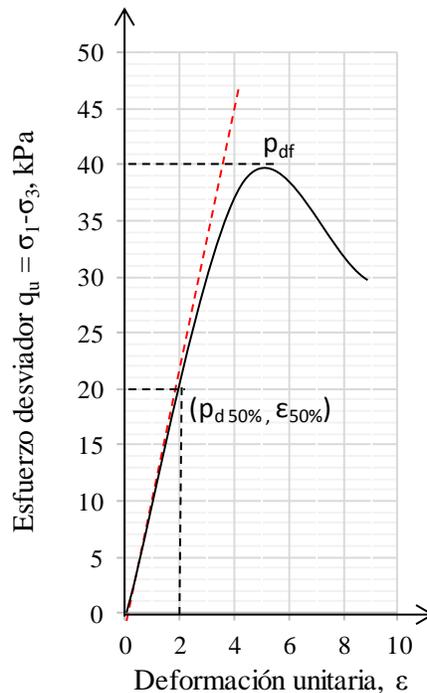


Figura 7.4. Curva esfuerzo – deformación, E_{50}

La idealización lineal de la relación esfuerzo-deformación de los suelos permite considerar su comportamiento como materiales elásticos ideales y aplicar consecuentemente las ecuaciones de la teoría de la elasticidad al cálculo de los esfuerzos y deformaciones inmediatas de un suelo causado por un incremento de presión vertical aplicado a una cimentación somera [36].

Es importante señalar que existen otras metodologías para determinar estos parámetros, tales como las pruebas triaxiales CU con medición de presión de poro (de esta forma se pueden obtener los módulos en términos de esfuerzos efectivos y totales) para disminuir los efectos de fracturamiento o microfisuras de la muestra.

7.3. DEFINICIONES

Resistencia a la compresión simple (q_u). Mínimo esfuerzo de compresión axial necesario para romper una muestra no confinada de suelo de forma cilíndrica en condiciones normalizadas. Se toma como la máxima carga alcanzada por unidad de área durante el ensayo.

Resistencia al corte. Se le refiere como criterio de falla de Mohr-Coulomb definida en términos del esfuerzo totales o efectivos como:

$$\tau = S = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (7.3)$$

Donde:

σ' = Esfuerzo normal efectivo en el plano de corte. $\sigma' = \sigma - u$, kPa

σ = Esfuerzo total, kPa

u = Presión de poro, kPa

c' = Resistencia no drenada, o cohesión aparente, kPa

ϕ' = Ángulo de fricción por esfuerzo efectivo, ($^{\circ}$)

Para los especímenes de suelos cohesivos sometidos al ensayo de resistencia a la compresión no confinada, la resistencia al corte puede estimarse a partir de la resistencia a la compresión, como se define en la expresión 7.1 y para el caso de los ensayos triaxiales tipo UU se puede emplear la envolvente definida por $\tau = c_u$.

Cohesión. Es la atracción entre partículas adyacentes originada por las fuerzas moleculares y las películas de agua. La cohesión aumenta con el descenso en el contenido de humedad; esto se debe a la disminución del espesor de la película de agua. La arcilla tiene una cohesión mucho mayor que las arenas finas, como resultado de mayor cantidad de películas de agua y una mayor superficie de contacto.

Módulos de Elasticidad E_u . Se determina con la pendiente de la recta secante de la curva $\sigma - \varepsilon$ que se forma entre el origen y un punto de la curva determinado al 50% del esfuerzo máximo.

7.4. CONSIDERACIONES DE EJECUCIÓN Y DE ANÁLISIS

Las variantes consideradas en los materiales y procesos normados en la ASTM para realizar las pruebas de resistencia de compresión simple (UCS) y triaxial tipo UU en el laboratorio se listan a continuación:

1. Las dimensiones de las probetas ensayadas corresponden a la relación diámetro-altura (1:2), diámetro de 4" (10.16 cm) y altura de 8" (20.00 cm).
2. La energía de compactación empleada para las dimensiones de la probeta corresponde a la prueba Proctor estándar. $E_c = 600 \text{ kN} - \text{m}/\text{m}^3$.
3. Compactación de las mezclas de suelo-CaO posterior a la primera hora de su mezclado y en los porcentajes definidos en los "Capítulos 4 y 5".
4. Condición de análisis I. La determinación de la resistencia se evaluó para los siguientes periodos: 7, 14, 21 y 69 días de curado evitando la pérdida de humedad de las probetas.
5. Condición de análisis II. Se consideró adicionalmente una condición de análisis que represente la pérdida de humedad que pueda presentarse en campo ocasionada por el secado de las mezclas. La evaluación de la resistencia se determinó para especímenes sometidos a un periodo de curado de 24 días y posteriormente su exposición o secado a la temperatura ambiente ($20^{\circ}\text{C} - 23^{\circ}\text{C}$) por 37 días previos a la ejecución de la compresión simple.
6. La ejecución de las pruebas triaxiales de tipo UU tiene el objetivo de verificar la evolución de la resistencia para diversos confinamientos y exponer los resultados para investigaciones futuras, en diferentes ámbitos de aplicación.

7.5. TRABAJOS DE LABORATORIO

Los trabajos de laboratorio consistieron en la elaboración de las probetas necesarias, con las características geométricas expuestas en el inciso anterior y compactadas según la ASTM D-698, como se resume en los puntos a continuación:

- Mezclado del material suelo-CaO con el porcentaje definido en los “Capítulos 4 y 5”.
- Reposo de la mezcla durante la primera hora posterior al inicio del mezclado.
- Compactación de especímenes por muestra con energía de compactación tipo Proctor estándar, según la siguiente variante por tamaño de probeta, de acuerdo con la expresión 4.1, donde:

W = Peso del pisón; 5,5 lbf (24,4 N)

h = Altura de caída del pisón; 12” (30.48 cm)

n = Número de capas; 5

N = Número de golpes por capa; 26

V = Volumen del molde de 4” (10.16 cm) y altura de 8” (12.70 cm)

E_c = Energía específica; 12 400 lb-pie/pie³ (600 kN-m/m³)

$$E_c = \frac{W h n N}{V} = \frac{(0.0244 \text{ kN})(0.3048 \text{ m})(5)(26)}{\left[\left(\frac{\pi * (0.1016 \text{ m})^2}{4}\right)(0.2 \text{ m})\right]} = 596 \text{ kN} - \text{m/m}^3$$

- Condición de análisis I. Curado mediante el resguardo de las probetas en bolsas de plástico selladas herméticamente y resguardadas dentro de un contenedor con humedad suficiente para evitar la pérdida de humedad.
- Condición de análisis II. Para determinar la resistencia de los especímenes sometidos a secado se consideró un curado igual al indicado en el punto anterior, para un periodo de 24 días y posteriormente su exposición a la temperatura ambiente (20°C – 23°C) dentro de laboratorio por 37 días mediante la eliminación total de la protección ante pérdida de humedad.
- La ejecución de la prueba tipo UCS se realiza para dos condiciones, para especímenes elaborados en el laboratorio y para especímenes inalterados extraídos de las plataformas de prueba (corazón, Plataforma 1).
- La ejecución de las pruebas triaxiales tipo UU corresponden únicamente a especímenes elaborados en el laboratorio.

7.5.1. Prueba de compresión simple (UCS).

7.5.1.1. Pruebas sobre especímenes elaborados en el laboratorio.

Los resultados de laboratorio obtenidos para las tres muestras de suelo analizadas en condiciones naturales (sin adición de CaO) se resumen en la “Tabla 7.1”.

Tabla 7.1 Resumen de resultados de prueba UCS, muestra en estado natural, sin CaO

Muestra	E ₅₀ kPa	w _i %	e _i	S _r %	G _s	γ _{mi} kN/m ³	σ ₁ kPa	c _u kPa
*S-1	33.86	170.20	5.32	87.01	2.46	11.40	24.80	12.40
**M-1	32.20	100.03	2.87	99.39	2.67	14.45	19.75	9.88
**M-2	6.42	50.03	1.47	89.47	2.69	15.66	16.67	8.33
							σ ₃ =	0.0

* Inalterada
** Reconstituida

Los resultados de laboratorio obtenidos para la muestra de suelo S-1 mezcladas con 15% CaO y compactadas después de la primer hora de su mezclado se resumen en la “Tabla 7.2”. Las “Figuras 7.5 y 7.6”, corresponden a las curvas esfuerzo-deformación unitaria (σ – ε) y a la representación gráfica en el círculo de Mohr en función del periodo de curado.

Tabla 7.2 Resumen de resultados de prueba UCS, muestra S-1 con 15% de CaO

Curado Día	E ₅₀ kPa	S _r %	w _i %	e _i	γ _{mi} kN/m ³	γ _d kN/m ³	σ ₁ kPa
7	114,582	99.05	71.36	1.77	15.21	8.87	987
14	135,297	99.87	71.08	1.75	15.30	8.94	1,205
21	203,159	85.47	53.24	1.53	14.89	9.71	1,540
69	188,395	98.26	63.99	1.60	15.50	9.45	1,958
24*	6,948	52.14	29.85	1.41	13.26	10.22	737

* probetas con secado al ambiente por un periodo adicional de 37 días σ₃ = 0 kPa G_s = 2.46

La “Figura 7.5” muestra el comportamiento de la deformación unitaria y la resistencia última en función del periodo de curado de las probetas, para un porcentaje de CaO constante (15%).

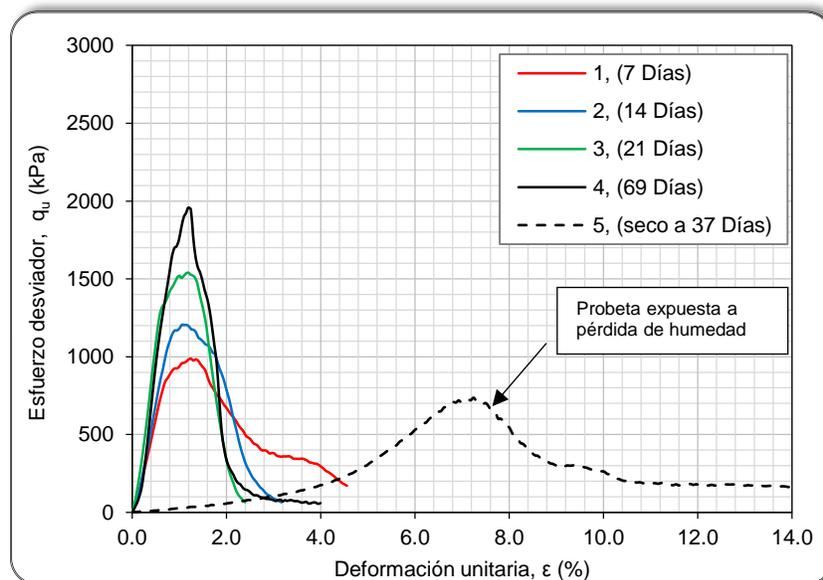


Figura 7.5. Curva esfuerzo – deformación, resultados UCS en mezcla S-1 con 15% de CaO

A corto y mediano plazo el comportamiento de la resistencia última se incrementa y la deformación unitaria es prácticamente constante, excepto para la probeta sometida a secado, la cual presenta una disminución en

la resistencia y un incremento en la deformación unitaria. Esto último permite considerar que bajo determinada condición de trabajo las mezclas pueden permitir mayores deformaciones conservando un valor de resistencia significativo, en comparación con la resistencia de los materiales en estado natural.

La “Figura 7.6” muestra la evolución de la resistencia en función del periodo de curado de las probetas, para un porcentaje de CaO constante (15%). La tasa de variación de la resistencia por regresión lineal es del orden +7.1.

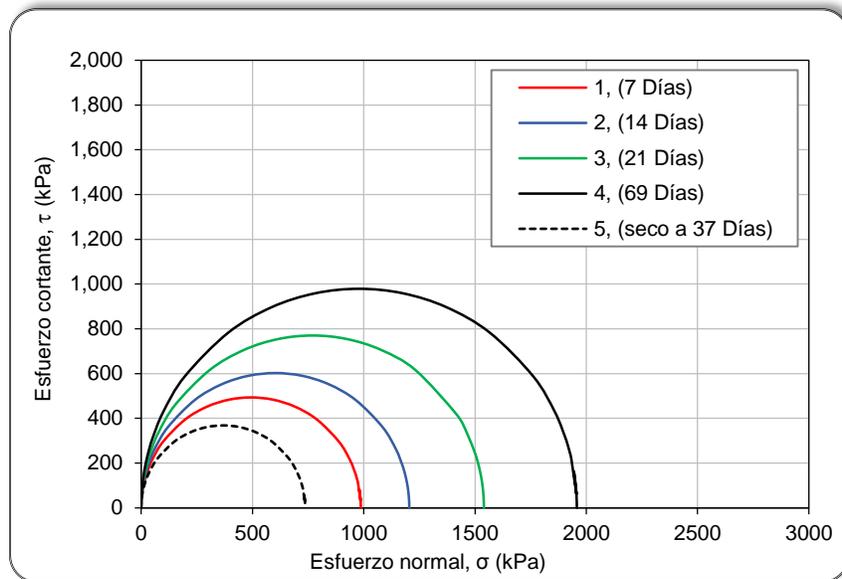


Figura 7.6. Círculo de Mohr, resultados UCS en mezcla S-1 con 15% de CaO

Los resultados de laboratorio obtenidos para la muestra de suelo M-1 mezcladas con 15% CaO y compactadas después de la primer hora de su mezclado se resumen en la “Tabla 7.3”. Las “Figuras 7.7 y 7.8”, corresponden a las curvas esfuerzo-deformación unitaria ($\sigma - \epsilon$) y a la representación gráfica en el círculo de Mohr en función del periodo de curado.

Tabla 7.3 Resumen de resultados de prueba UCS, muestra M-1 con 15% de CaO

Curado Día	E ₅₀ kPa	Sr %	w _i %	e _i	γ _{mi} kN/m ³	γ _d kN/m ³	σ ₁ kPa
7	207,333	94.09	49.59	1.41	16.59	11.09	1,638
14	392,078	84.64	49.14	1.55	15.61	10.47	1,930
21	376,139	76.33	45.66	1.60	14.98	10.28	2,367
24*	39,935	43.53	21.32	1.31	14.04	11.57	1,162

* probetas con secado al ambiente por un periodo adicional de 37 días

σ₃ = 0 kPa G_s = 2.67

La “Figura 7.7” muestra el comportamiento de la deformación unitaria y la resistencia última en función del periodo de curado de las probetas, para un porcentaje de CaO constante (15%).

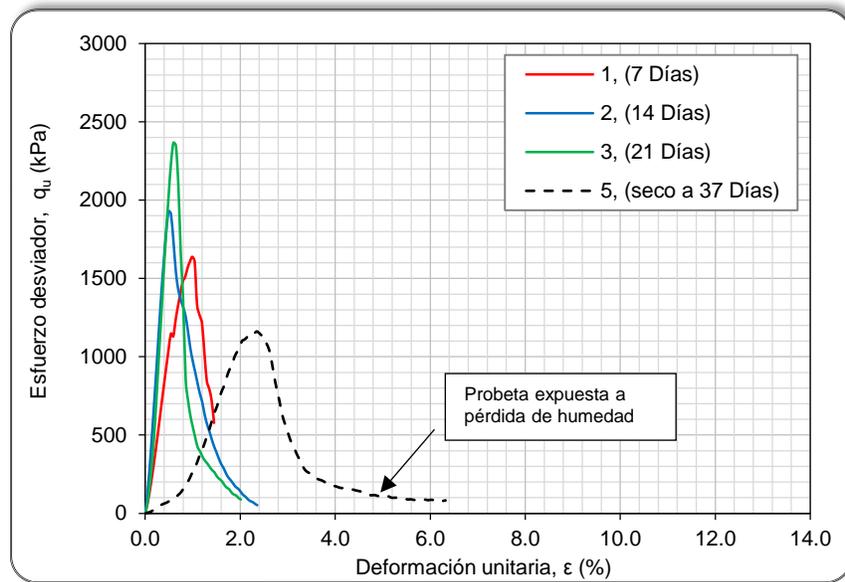


Figura 7.7. Curva esfuerzo – deformación, resultados UCS en mezcla M-1 con 15% de CaO

A corto y mediano plazo el comportamiento de la resistencia última se incrementa y la deformación unitaria es prácticamente constante, excepto para la probeta sometida a secado, la cual presenta una disminución en la resistencia y un incremento en la deformación unitaria. Esto último permite considerar que bajo determinada condición de trabajo las mezclas pueden permitir mayores deformaciones conservando un valor de resistencia significativo, en comparación con la resistencia de los materiales en estado natural.

La “Figura 7.8” muestra la evolución de la resistencia en función del periodo de curado de las probetas, para un porcentaje de CaO constante (15%). La tasa de variación de la resistencia por regresión lineal es del orden +23.8.

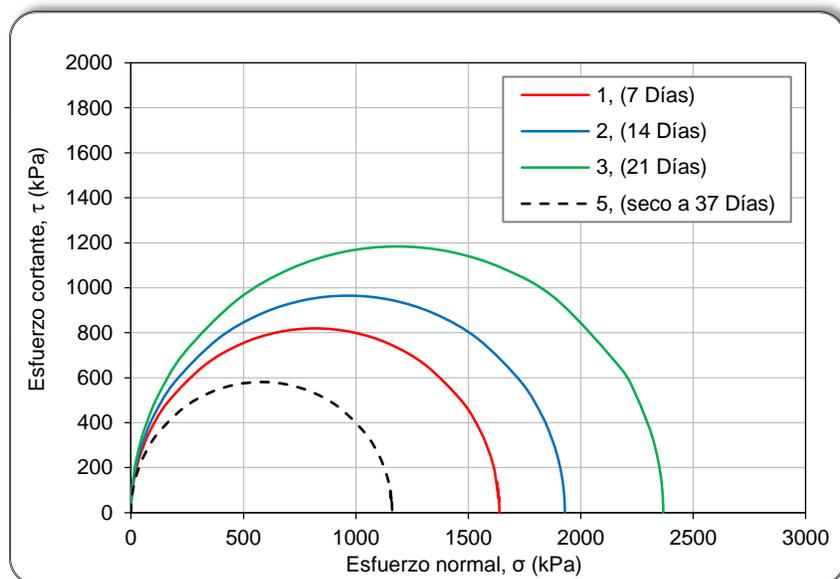


Figura 7.8. Círculo de Mohr, resultados UCS en mezcla M-1 con 15% de CaO

Los resultados de laboratorio obtenidos para la muestra de suelo M-2 mezcladas con 5% CaO y compactadas después de la primer hora de su mezclado, se resumen en la “Tabla 7.4”. Las “Figuras 7.9 y 7.10”, corresponden a las curvas esfuerzo-deformación unitaria ($\sigma - \epsilon$) y a la representación gráfica en el círculo de Mohr en función del periodo de curado.

Tabla 7.4 Resumen de resultados de prueba UCS, muestra M-2 con 5% de CaO

Curado Día	E ₅₀ kPa	Sr %	w _i %	e _i	γ_{mi} kN/m ³	γ_d kN/m ³	σ_1 kPa
7	206,561	93.07	52.57	1.52	16.29	10.68	1,298
14	243,568	93.17	53.25	1.54	16.25	10.60	1,759
21	249,294	92.41	52.21	1.52	16.25	10.68	2,063
69	282,404	93.94	54.92	1.57	16.20	10.46	2,953
24*	14,684	31.69	13.26	1.13	14.34	12.66	769

* probetas con secado al ambiente por un periodo adicional de 37 días $\sigma_3 = 0$ kPa Gs = 2.69

La “Figura 7.9” muestra el comportamiento de la deformación unitaria y la resistencia última en función del periodo de curado de las probetas, para un porcentaje de CaO constante (5%).

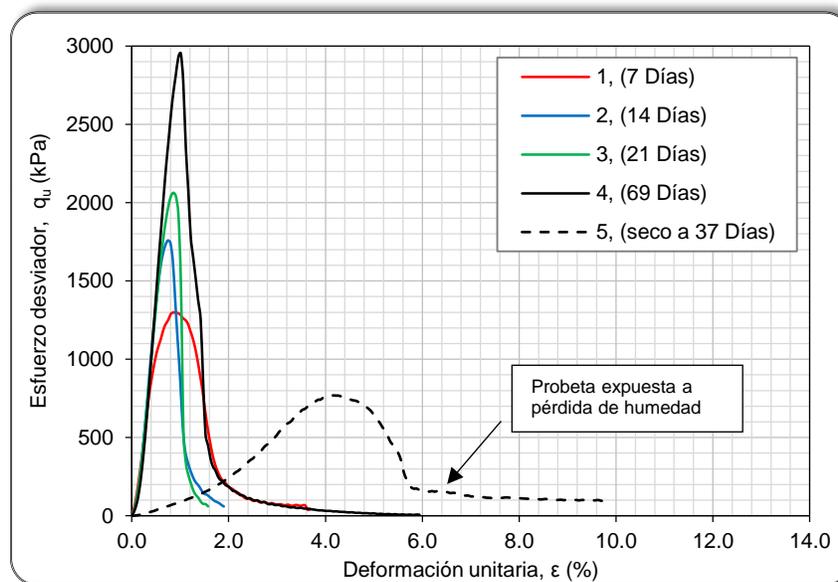


Figura 7.9. Curva esfuerzo – deformación, resultados UCS en mezcla M-2 con 5% de CaO

A corto y mediano plazo el comportamiento de la resistencia última se incrementa y la deformación unitaria es prácticamente constante, excepto para la probeta sometida a secado, la cual presenta una disminución en la resistencia y un incremento en la deformación unitaria. Esto último permite considerar que bajo determinada condición de trabajo las mezclas pueden permitir mayores deformaciones conservando un valor de resistencia significativo, en comparación con la resistencia de los materiales en estado natural.

La “Figura 7.10” muestra la evolución de la resistencia en función del periodo de curado de las probetas, para un porcentaje de CaO constante (5%). La tasa de variación de la resistencia por regresión lineal es del orden +12.2.

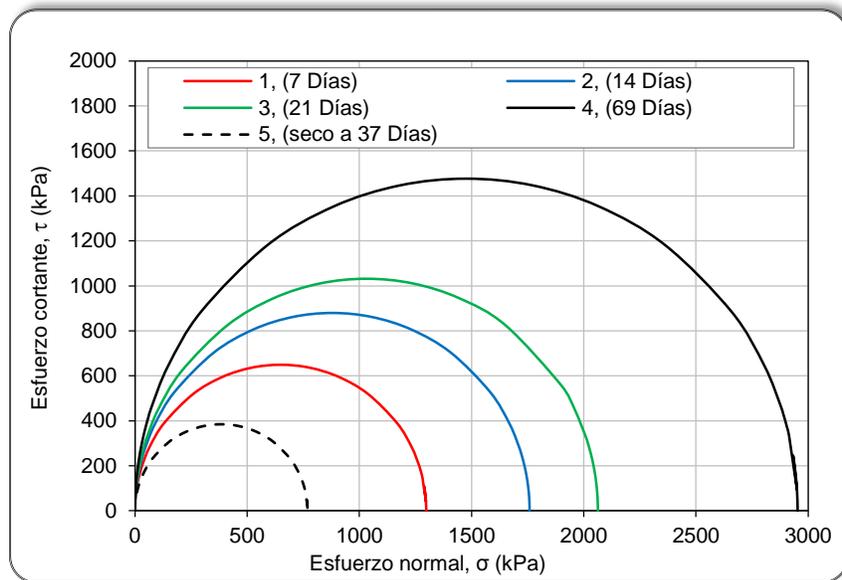


Figura 7.10. Círculo de Mohr, resultados UCS en mezcla M-2 con 5% de CaO

7.5.1.2. Pruebas sobre especímenes inalterados, Plataforma 1 (ANFACAL).

Los resultados de laboratorio obtenidos para la muestra de suelo previamente estabilizado en campo P-1 se resumen en la “Tabla 7.5”. Las “Figuras 7.11 y 7.12”, corresponden a las curvas esfuerzo-deformación unitaria ($\sigma - \epsilon$) y a la representación gráfica en el círculo de Mohr.

Es importante mencionar que la plataforma de prueba identificada como “Plataforma 1” se construyó adicionando 10% de CaO en el mes de julio del 2015, se muestreó en junio del 2016 y se ensayó en el mes de diciembre del 2016, a una edad de 510 días.

Tabla 7.5 Resumen de resultados de prueba UCS, muestra P-1 con 10% de CaO

Curado Día	E ₅₀ kPa	Sr %	w _i %	e _i	γ_{mi} kN/m ³	γ_d kN/m ³	σ_1 kPa
510	178,036	91.45	71.36	2.11	14.91	8.70	977

$\sigma_3 = 0$ kPa G_s = 2.71

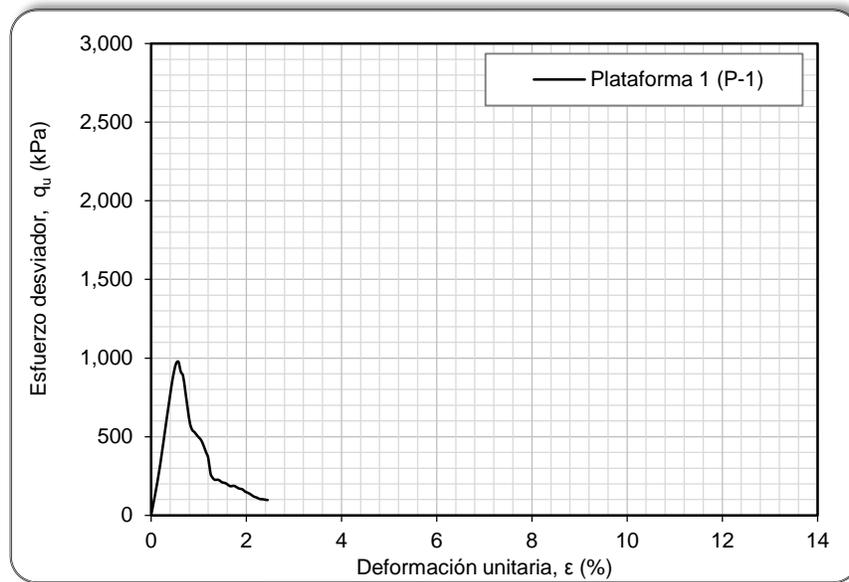


Figura 7.11. Curva esfuerzo – deformación, resultados UCS en mezcla P-1 con 10% de CaO

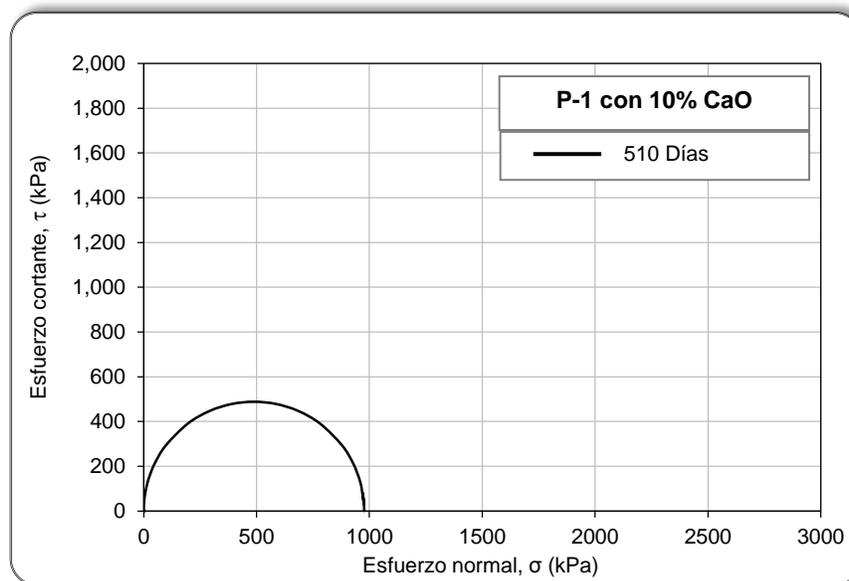


Figura 7.12. Círculo de Mohr, resultados UCS en mezcla P-1 con 10% de CaO

7.5.2. Pruebas triaxiales tipo UU.

Los resultados de laboratorio obtenidos para las mezclas de suelo S-1 con 15% de CaO, M-1 con 15% de CaO y M-2 con 5% de CaO, compactadas después de la primera hora de su mezclado se resumen en las “Tablas 7.6 a 7.8” y su representación gráfica de los círculos de Mohr en las “Figuras 7.13 a 7.15”, respectivamente.

Al igual que los resultados obtenidos en el inciso 7.5.1, se observa un incremento generalizado en las propiedades mecánicas de las mezclas estabilizadas.

Es importante mencionar que no fue posible trazar una envolvente de resistencia representativa que muestre la evolución de la resistencia de los especímenes, debido a la variación de los confinamientos entre cada periodo de fraguado considerado. Los confinamientos representan condiciones distintas (mayores profundidades) a los alcances de la investigación, sin embargo, los resultados que se presentan a continuación pueden ser considerados para nuevas líneas de investigación mediante la aplicación del CaO.

Tabla 7.6 Resumen de resultados de prueba UU, muestra S-1 con 15% de CaO

E₅₀ kPa	Sr %	w_i %	e_i	γ_{mi} kN/m ³	γ_d kN/m ³	σ₃ kPa	σ₁ kPa
<i>Probetas a 7 días de curado.</i>							
160,879	100.00	68.96	1.67	15.54	9.20	510.0	2,657
169,010	97.87	67.86	1.71	15.26	9.09	1,020.0	3,395
179,723	85.49	67.62	1.95	14.00	8.35	1,530.0	3,460
Promedio	94.45	68.15	1.78	14.93	8.88		
<i>Probetas a 14 días de curado.</i>							
438,987	100.00	66.67	1.57	15.94	9.56	9.0	2,062
391,401	97.52	66.64	1.68	15.29	9.18	20.0	2,427
433,215	97.60	67.02	1.69	15.28	9.15	45.0	2,595
Promedio	98.37	66.77	1.65	15.50	9.30		
<i>Probetas a 21 días de curado.</i>							
871,654	93.69	49.78	1.31	15.97	10.66	10.0	4,259
658,782	95.00	49.58	1.28	16.11	10.77	25.0	4,658
638,360	95.48	49.46	1.27	16.17	10.82	40.0	4,960
Promedio	94.73	49.61	1.29	16.08	10.75		

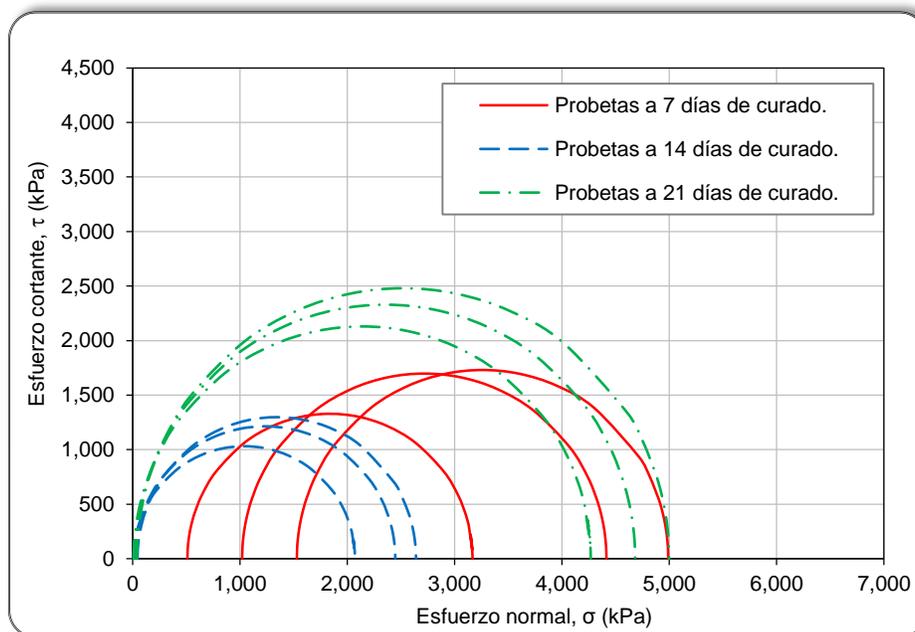


Figura 7.13. Círculo de Mohr, resultados UCS en mezcla S-1 con 15% de CaO

Tabla 7.7 Resumen de resultados de prueba UU, muestra M-1 con 15% de CaO

E₅₀ kPa	Sr %	w_i %	e_i	γ_{mi} kN/m ³	γ_d kN/m ³	σ₃ kPa	σ₁ kPa
<i>Probetas a 7 días de curado.</i>							
389,808	91.76	55.52	1.62	15.88	10.21	40.0	3,915
394,121	89.87	55.59	1.65	15.67	10.07	250.0	4,380
325,013	92.63	57.09	1.65	15.85	10.09	450.0	4,465
Promedio	91.42	56.07	1.64	15.80	10.12		
<i>Probetas a 14 días de curado.</i>							
414,201	96.49	62.44	1.73	15.90	9.79	48.0	3,392
316,004	95.70	62.62	1.75	15.81	9.72	153.0	3,482
293,461	95.29	62.40	1.75	15.78	9.71	1,021.0	5,095
Promedio	96.09	62.49	1.74	15.85	9.75		

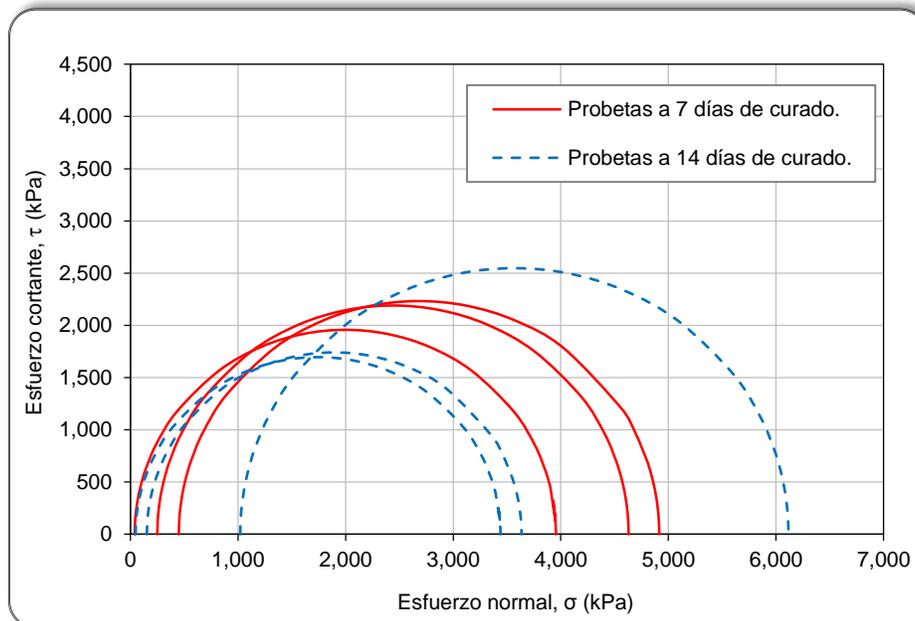


Figura 7.14. Círculo de Mohr, resultados UCS en mezcla M-1 con 15% de CaO

Tabla 7.8 Resumen de resultados de prueba UU, muestra M-2 con 5% de CaO

E₅₀ kPa	Sr %	w_i %	e_i	γ_{mi} kN/m ³	γ_d kN/m ³	σ₃ kPa	σ₁ kPa
<i>Probetas a 14 días de curado.</i>							
176,674	94.12	71.42	2.04	15.16	0.88	40.8	1,404
107,583	93.53	64.91	1.87	15.47	0.94	510.0	3,051
126,317	94.21	63.98	1.83	15.60	0.95	154.0	2,382
Promedio	93.95	66.77	1.91	15.41	0.92		
<i>Probetas a 21 días de curado.</i>							
126,350	93.94	70.03	2.01	15.22	0.90	39.9	1,897
108,513	94.55	69.91	1.99	15.29	0.90	25.0	1,699
96,597	93.77	70.84	2.03	15.16	0.89	10.3	1,426
Promedio	94.09	70.26	2.01	15.22	0.89		

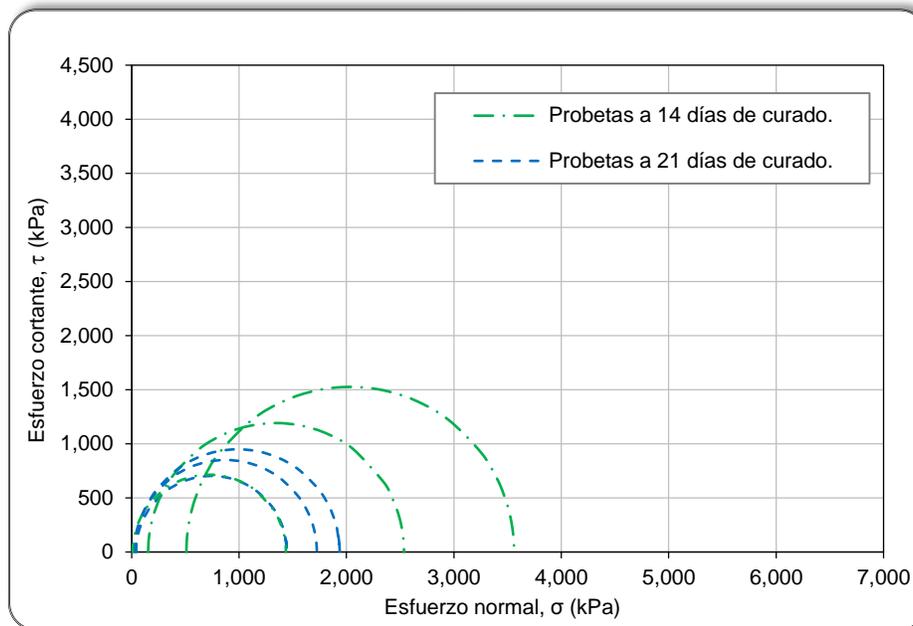


Figura 7.15. Círculo de Mohr, resultados UCS en mezcla M-2 con 5% de CaO

7.6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se avaluó la evolución de la resistencia en función del periodo de fraguado de los especímenes estabilizados con CaO.

Las variables analizadas en este capítulo son: q_u , c_u , E_u y tiempo (corto y mediano plazo).

De acuerdo con los resultados del inciso 7.5.1.1, en condiciones de corto y mediano plazo se aprecia un incremento generalizado de la resistencia de las probetas de suelo S-1, M-1 y M-2, estabilizadas con CaO.

En las siguientes tablas (Tabla 7.9 a Tabla 7.11) y figuras (Figura 7.16 a Figura 7.21) se presenta la comparación de los resultados obtenidos, considerando los materiales con y sin la adición del CaO. En general el comportamiento de la resistencia es evolutivo con el incremento del periodo de curado logrando resistencias superiores a los 900 kPa, valor que supera en gran medida la resistencia de los materiales en estado natural (sin CaO). Esta evolución se puede lograr en campo siempre y cuando se mantenga el material en condiciones de humedad próximas a las determinadas en los ensayos de laboratorio, de lo contrario la resistencia lograda podrá verse disminuida por efectos de secado o pérdida de humedad como se muestra en los resultados del inciso 7.5.1.1.

El cálculo del E_u presentado en este capítulo para las condiciones de análisis I y II definidas en el inciso 7.4 es mediante el empleo de la “expresión 7.2”, sin embargo, se aclara que la condición II requiere de una interpretación particular, misma que no forma parte de los alcances de la presente investigación.

Tabla 7.9 Evolución de parámetros de resistencia con el tiempo de curado en prueba UCS, mezcla S-1 con 15% de CaO

Curado	Esfuerzo desviador	Resistencia al esfuerzo cortante	Contenido de agua	Módulo de elasticidad
Días	q_u kPa	$\tau = c = q_u/2$ kPa	w %	E_{50} kPa
Estado natural	25	13	170	35
7	987	493	71	114,582
14	1,205	602	71	135,297
21	1,540	770	53	203,159
69	1,958	979	64	188,395
24*	737	368	30	6,948

* probeta con secado al ambiente por 37 días

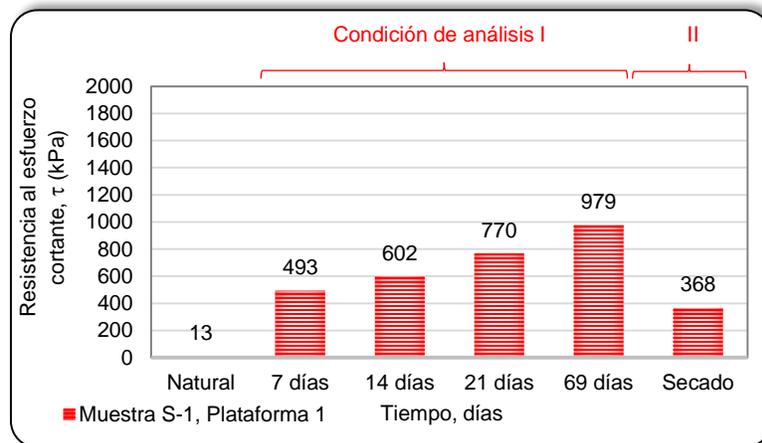


Figura 7.16. c_u vs tiempo de curado en prueba UCS, mezcla S-1 con 15% de CaO

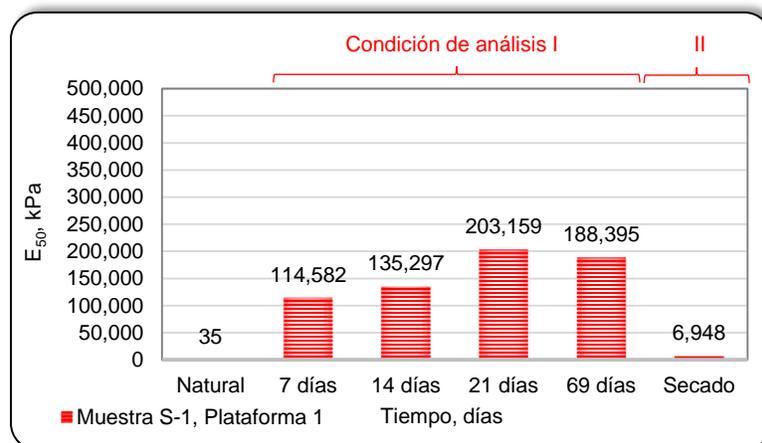


Figura 7.17. E_{50} vs tiempo de curado en prueba UCS, mezcla S-1 con 15% de CaO

Tabla 7.10 Evolución de parámetros de resistencia con el tiempo de curado en prueba UCS, mezcla M-1 con 15% de CaO

Curado	Esfuerzo desviador	Resistencia al esfuerzo cortante	Contenido de agua	Módulo de elasticidad
Días	q_u kPa	$\tau = c = q_u/2$ kPa	w %	E_{50} kPa
Estado natural	20	10	100	33
7	1,638	819	50	207,333
14	1,930	965	49	392,078
21	2,367	1,184	46	376,139
69	---	---	---	---
24*	1,162	581	21	39,935

* probeta con secado al ambiente por 37 días

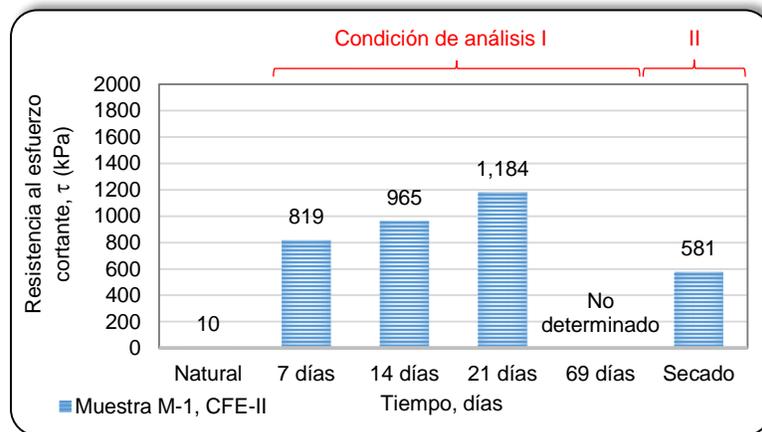


Figura 7.18. c_u vs tiempo de curado en prueba UCS, mezcla M-1 con 15% de CaO

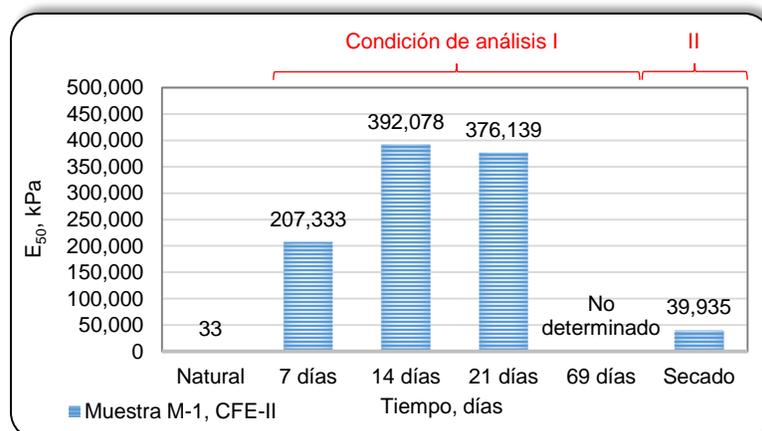


Figura 7.19. E_{50} vs tiempo de curado en prueba UCS, mezcla M-1 con 15% de CaO

Tabla 7.11 Evolución de parámetros de resistencia con el tiempo de curado en prueba UCS, muestra M-2 con 5% de CaO

Curado	Esfuerzo desviador	Resistencia al esfuerzo cortante	Contenido de agua	Módulo de elasticidad
Días	q_u kPa	$\tau = c = q_u/2$ kPa	w %	E_{50} kPa
Estado natural	17	8	50	7
7	1,298	649	53	206,561
14	1,759	879	53	243,568
21	2,063	1,032	52	249,294
69	2,953	1,477	55	282,404
24*	769	384	13	14,684

* probeta con secado al ambiente por 37 días

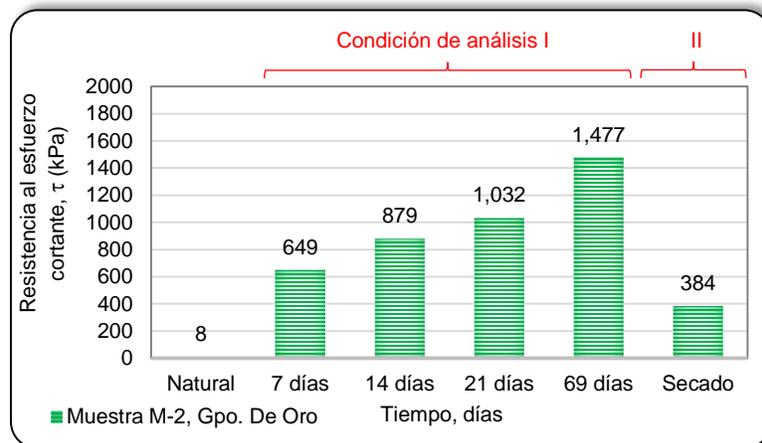


Figura 7.20. c_u vs tiempo de curado en prueba UCS, mezcla M-2 con 5% de CaO

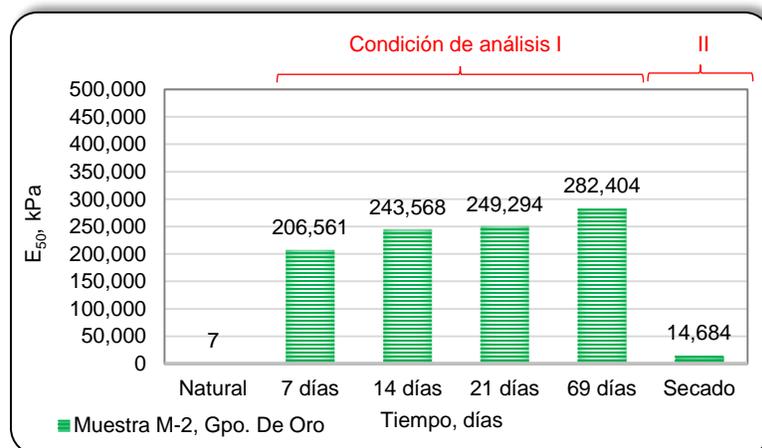


Figura 7.21. E_{50} vs tiempo de curado en prueba UCS, mezcla M-2 con 5% de CaO

Referente a las probetas sometidas a secado a temperatura ambiente por 37 días, se observa una disminución importante de la resistencia en comparación con los resultados obtenidos para los mismos suelos a una edad de curado de 69 días; sin embargo, dicha disminución si bien es significativa ante las altas resistencias alcanzadas, la magnitud obtenida continúa siendo elevada para los fines investigados ($c_u = q_u/2 = 740\text{kPa}/2 = 370\text{kPa} = 37\text{ t/m}^2$), lo que favorece la aplicación práctica del óxido de calcio (CaO) para estabilizar los suelos arcillosos a nivel superficial.

De acuerdo con los resultados del inciso 7.5.1.2 en condiciones de mediano plazo (a 510 días), se aprecia un incremento de la resistencia a la compresión simple ($c_u = q_u/2 = 980\text{kPa}/2 = 490\text{kPa} = 49\text{ t/m}^2$), para la plataforma de prueba P-1.

La “Figura 7.22” muestra la comparación de las resistencias (UCS) obtenidas de las muestras S-1 y P-1 (materiales de la misma zona de muestreo y de iguales características físicas estabilizados con diferentes porcentajes de CaO, inciso 1.4) donde se puede observar que la variación de la resistencia depende tanto del porcentaje de CaO adicionado como del periodo de fraguado y de la humedad que posean las mezclas durante su evaluación en laboratorio, condiciones que en suma deben ser consideradas en cualquier diseño de aplicación.

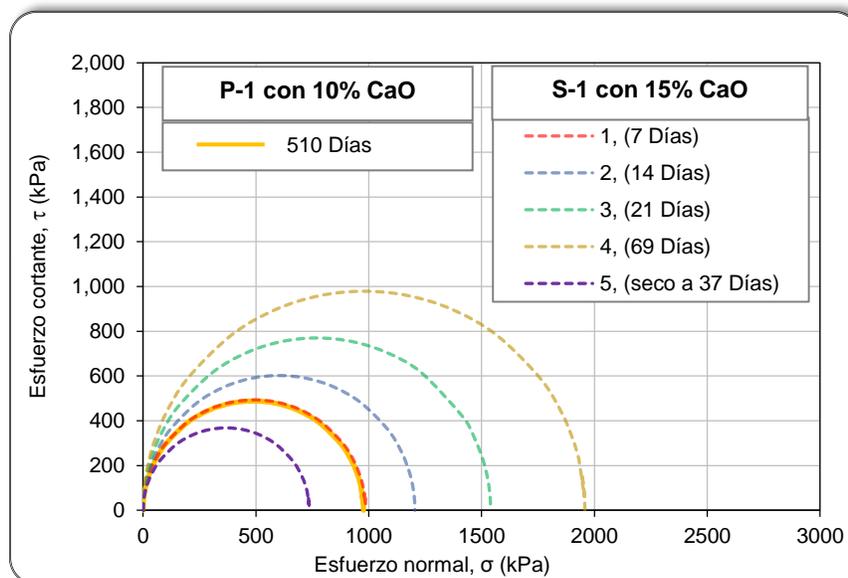


Figura 7.22. Resumen de resultados UCS. Círculo de Mohr, mezcla P-1 con 10% de CaO y mezcla S-1 con 15% de CaO

La “Figura 7.23” muestra la relación entre la resistencia máxima y la humedad de las mezclas, a menor contenido de agua (w) menor resistencia (UCS), para las probetas con contenido de agua superior al 45% se presentan resistencias del orden o superiores a 1 MPa. Las resistencias mínimas corresponden a las probetas sometidas a secado ambiente.

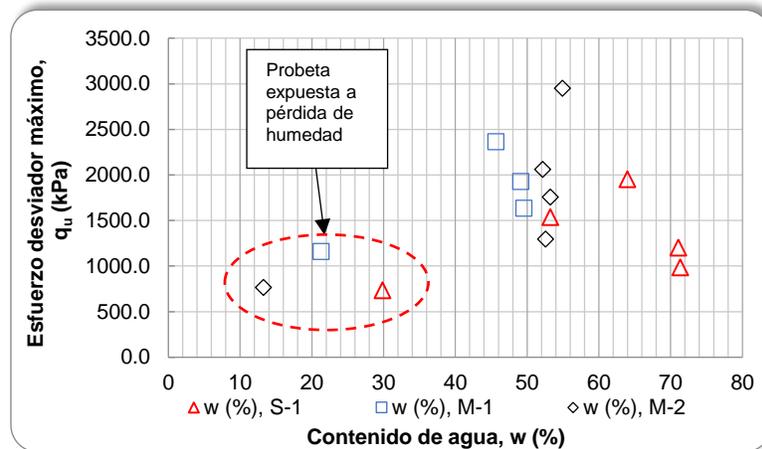


Figura 7.23. Variación del esfuerzo desviador máximo (q_u) y el contenido de agua (w) en el ensaye UCS

La “Figura 7.24” presenta la relación entre la resistencia máxima y la deformación unitaria de las probetas ensayadas a compresión simple (UCS), las resistencias máximas se logran para deformaciones unitarias menores al 1.4% y las deformaciones máximas se presentaron para los especímenes con contenido de agua menor a 30%. Por lo anterior se puede considerar que bajo ciertas condiciones las mezclas podrán permitir mayores deformaciones conservando un valor aceptable de su resistencia. Las resistencias mínimas que muestran mayores deformaciones corresponden a las probetas sometidas a secado ambiente.

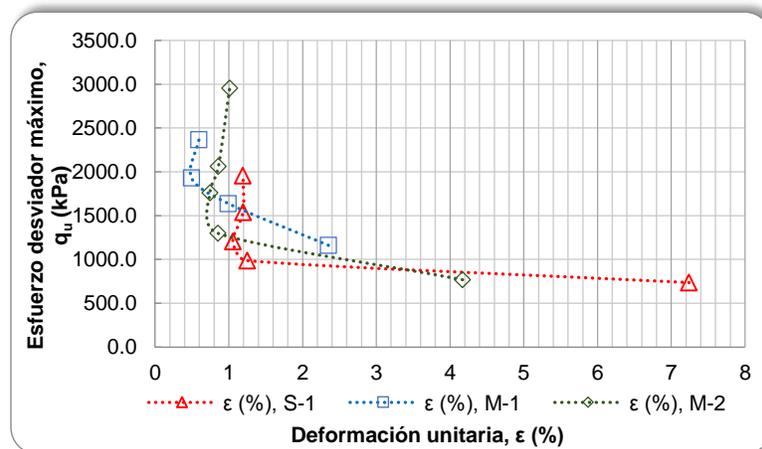


Figura 7.24. Variación del esfuerzo desviador máximo (q_u) y la deformación unitaria (ϵ) en el ensaye UCS

De acuerdo con los resultados del inciso 7.5.2, al igual que en el inciso 7.5.1.1, se aprecia un incremento generalizado de la resistencia de las probetas de suelo S-1, M-1 y M-2, estabilizadas con CaO; sin embargo, la variación de los confinamientos considerados en los ensayos realizados no permite concluir de forma contundente una envolvente de falla como la mencionada en el inciso 7.2.2 (Figura 7.3). Por otro lado, los resultados obtenidos permiten ampliar la visión para estudiar la aplicación del óxido de calcio (CaO) en otro tipo de proyectos de la ingeniería que quedan fuera del alcance de la presente investigación, como lo

es el caso de bordos y mejoramiento de cimentaciones a mayores profundidades, destacando dentro de los resultados su basta resistencia, el peso volumétrico y su capacidad de deformación, escenarios que requieren de otro tipo de pruebas de laboratorio y que deben ser analizados en futuras investigaciones.

La “Tabla 7.12” muestra los pesos volumétricos máximos representativos de materiales empleados comúnmente en la construcción de terracerías como el “Tepetate” y el “Tezontle”. El promedio de los pesos volumétricos obtenidos en las mezclas de suelo-CaO son del orden de 10.41 kN/m³ y 15.40 kN/m³ para el peso volumétrico seco (γ_d) y el peso volumétrico húmedo (γ_m) respectivamente. Lo anterior permite realizar una comparación entre los distintos pesos volumétricos analizados, el γ_d de las mezclas de suelo-CaO representa una disminución del orden del 35% y 13% en comparación con los γ_d del tepetate y tezontle respectivamente, el γ_m de las mezclas de suelo-CaO representa una disminución del orden del 19% y 4% en comparación con los γ_m del tepetate y tezontle respectivamente.

Tabla 7.12 Pesos volumétricos máximos de materiales en terracerías

Material	Peso volumétrico máximo	
		(kN/m ³)
Tepetate	seco	16.00
	saturado	19.00
Tezontle	seco	12.00
	saturado	16.00

El conjunto de resultados mostrados en el presente capítulo en términos de resistencia y de peso volumétrico permiten considerar que los efectos de estabilización de materiales arcillosos convierten el material natural en un material eficiente y ligero (Tabla 7.12), lo que favorece su empleo sobre los terrenos blandos del Ex Lago de Texcoco.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en la investigación de “Estabilización de los suelos superficiales del NAICM con Óxido de Calcio (CaO)” muestran que los materiales arcillosos estabilizados con CaO en los porcentajes adecuados se logra una mezcla con características físicas y químicas suficientes que permiten su aplicación en la construcción propiciando ahorros en costos y tiempos de construcción, además de propiciar el empleo de los materiales naturales del sitio y la atenuación del impacto ambiental.

Las modificaciones físicas a corto plazo de los suelos estabilizados permiten tener materiales desmenuzables y de mayor trabajabilidad, presentando una disminución del w_L y en menor medida una disminución del w_P , consecuentemente una reducción del IP y un cambio en la clasificación SUCS, de CH a MH.

La reacción química a largo plazo genera una reacción puzolánica similar a la de un cemento Portland, con lo cual se logra un incremento significativo en la resistencia de las muestras estabilizadas a través del tiempo de curado y la reducción de los cambios volumétricos.

Lo anterior beneficia de forma razonable al ámbito de las Vías Terrestres. Los resultados de CBR y de expansión, superan en buena medida a los valores establecidos por la normatividad vigente de la SCT para el caso de terracerías.

El conjunto de resultados obtenidos en la investigación en términos de resistencia y de peso volumétrico permiten considerar que los efectos de estabilización de materiales arcillosos convierten el material natural en un material eficiente y ligero, lo que favorece su empleo sobre los terrenos blandos del Ex Lago de Texcoco.

RECOMENDACIONES

La aplicación de la estabilización de suelos arcillosos puede enriquecerse mediante el desarrollo de los estudios listados a continuación:

- La aplicación del CaO a mayores profundidades en suelos con mayor humedad, de 300 a 400%.
- Analizar el comportamiento de la resistencia de las mezclas bajo condiciones de saturación.
- Analizar el comportamiento de la resistencia de las mezclas al estar sumergidas en agua.
- Analizar el comportamiento de las mezclas para altos confinamientos, además de estudiar su comportamiento dinámico.
- Analizar el comportamiento de la permeabilidad de las mezclas.
- Estudiar los procesos de aplicación de CaO en campo, para reproducir en mejor manera los resultados de laboratorio.
- Estudiar los efectos químicos producidos durante la mezcla de suelo-CaO y en específico a los causados por los sulfatos.
- Estudiar la aplicación de los parámetros obtenidos en la estabilización de arcillas, para el caso de cimentaciones, bordos, taludes, excavaciones profundas y su aplicación durante procesos constructivos de diversas obras de infraestructura civil.

REFERENCIAS

- [1] Grupo aeroportuario de la Ciudad de México. Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, 2015. <http://www.aeropuerto.gob.mx>
- [2] Murillo, F. R. Comportamiento del suelo y obras en el Ex Lago de Texcoco. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A. C. Núm. 238. 20–27., Diciembre 2015 - Febrero 2016.
- [3] Asociación Nacional de Fabricantes de Cal, ANFACAL, A.C. Uso de óxido de calcio (pulverizado), CaO, como estabilizador de las arcillas del Ex Lago de Texcoco, México 2016.
- [4] ANCADE, Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España. Zaragoza, Abril de 2008.
- [5] Mohamad Hassibi Chemco Systems L. P. “Factores que afectan la calidad de la cal viva (CaO). Publicación, Septiembre 2002 – Revisión 1, 17 de Marzo de 2009.
- [6] Foro de Construcción con Cal FOCCAL. www.foccal.org
- [7] National Lime Association. “Lime-Treated Soil Construction Manual: Lime Stabilization & Lime Modification,” 2004.
- [8] National Lime Association. “Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design,” June 2004.
- [9] ASTM D6276. Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization.
- [10] Elizondo A.F., Navas C. A., Sibaja O. D., Efecto de la cal en la estabilización de subrasantes, Ingeniería 20 (1 y 2): 93-108, ISSN: 1409-2441; 2010. San José, Costa Rica.
- [11] Das B.M. Fundamentos de ingeniería de cimentaciones. Cengage Learning Editores, S.A. de C.V., Séptima edición, 2012.
- [12] M.J. Mendoza. Determinación del límite líquido de suelos con el cono sueco. Instituto de Ingeniería de la UNAM.
- [13] ASTM D 2487. Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).
- [14] M.J. Mendoza. Técnicas Alternativas para la Determinación del Límite Líquido de Suelos. Instituto de Ingeniería de la UNAM.
- [15] Msc. Armas N.R. “Criterios sobre la compactación de suelos y el control de calidad de terraplenes”. CCIA 2008.
- [16] R.R. Proctor. Fundamental principles of soil compaction. Engineering News Record, 111 (9):245–248, 1933a.
- [17] R.R. Proctor. Description of field and laboratory methods. Engineering News Record, 111 (10):286–289, 1933b.
- [18] Peurifoy, R. Construction Planning, Equipment and Methods. 2002.
- [19] Flores, O. y Romo, M. P. (2003). “Propiedades estáticas y dinámicas del material del banco “La Concepción”. Reporte interno, Instituto de Ingeniería UNAM.
- [20] Asma Muhmed and Dariusz Wanatowski. Effect of Lime Stabilisation on the Strength and Microstructure of Clay. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X, Volume 6, Issue 3 (May. - Jun. 2013), PP 87-94
- [21] National Lime Association. “Lime The Versatile Chemical. Lime Terminology, Standards & Properties”. January 2007.
- [22] National Lime Association. “Mixture Design and Testing Procedures Mixture Design and Testing Procedures for Lime Stabilized Soil for Lime Stabilized Soil”. October 2006.
- [23] ASTM D6276 “Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization.” (www.astm.org).
- [24] GARY D. Christian. “Química Analítica” University of Washington Edit. McGRAW-HILL Sexta edición. México 2009.

REFERENCIAS

- [25] De La Luz V. M y & Ordorica V. M Á. (2009) “Ácidos, Bases, pH y Soluciones Reguladoras”. <http://www.bioquimica.dogsleep.net/Teoría/archivos/Unidad24.pdf>
- [26] NMX-C-416-ONNCCE-2003.
- [27] ASMT D-1883. “Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils” (www.astm.org)
- [28] ANFACAL. “Uso de óxido de calcio (pulverizado), CaO, como estabilizador de las arcillas del Ex Lago de Texcoco”. México 2017.
- [29] Métodos de muestreo y pruebas de materiales. Valor Soporte de California (CBR) y Expansión (Exp) en Laboratorio.
- [30] ANFACAL. Comunicación personal, 2017.
- [31] N·CMT·1·01/16. Materiales para Terraplén
- [32] N·CMT·1·02/02. Materiales para Subyacente.
- [33] N·CMT·1·03/02 Materiales para Subrasante.
- [34] N·CMT·4·02·001/16. Materiales para Sub-bases.
- [35] N·CMT·4·02·002/16. Materiales para Bases Hidráulicas.
- [36] Tamez E.G., Ingeniería de Cimentaciones, “Conceptos Básicos de la Práctica”. Edit. TGC Geotecnia S.A. de C.V., 2001.
- [37] ASMT D2166M. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil.
- [38] ASMT D5102. Standard Test Methods for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures.
- [39] ASMT D2850. Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils.
- [40] Little, D.N., Evaluation of Structural Properties of Lime Stabilized Soils and Aggregates, Volume 3: Mixture Design and Testing Protocol for Lime Stabilized Soils, National Lime Association, 2000 (<http://www.lime.org/SOIL3.PDF>).
- [41] Little, Dallas N. & F.A.M. Shafee Yusuf. “Example Problem Illustrating the Application of the NLA MDTP to Ascertain Engineering Properties of Lime-Treated Subgrades for Mechanistic Pavement Design/Analysis,” 2001. (http://www.lime.org/documents/publications/free_downloads/app-mdtp2001.pdf)
- [42] V.R. Ouhadi., R.N. Yong., M. Amiri., M.H. Ouhadi. Pozzolanic consolidation of stabilized soft clays. Applied Clay Science. (2014), Journal CLAY-02965.
- [43] ANCADE. Manual de estabilización de suelos con cemento o cal. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA). Madrid España.
- [44] Hernández, R. (1996). Estabilización de un suelo arcilloso con cal y su proceso constructivo. Tesis que para obtener el Título de Ingeniero Civil. Escuela Nacional de Estudios Profesionales Acatlán. Universidad Nacional Autónoma de México - UNAM. México DF. México. Tesis.
- [45] Nerinx N., Bonelli S., Puiatti D., Herrier G., Fry J., Tourment R. and Nicaise S. Impact of lime treated soils performance on design of earthfill dikes. FLOODrisk 2016 - 3rd European Conference on Flood Risk Management. (2016).
- [46] Musta B, Kassim A. & Mohd, Salim R. Effect of lime on permeability and microstructure of soil. Geological Society of Malaysia Annual Geological Conference 2002 May 26-272002, Kota Bharu, Kelantan, Malaysia.