

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**“ESTUDIO DE LA ESTABILIZACIÓN DE ARCILLAS EXPANSIVAS
UTILIZANDO EL 10, 20 Y 30% EN PESO, DE PUZOLANAS DE
CENIZA DEL VOLCÁN TUNGURAHUA Y CENIZA DE LA
CASCARILLA DE ARROZ EN COMPOSICIONES IGUALES”**

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

CRISTHIAN ABEL LICUY ORDÓÑEZ
cristhianabel69@hotmail.com

KARINA ELIZABETH ROMÁN SOLÓRZANO
karinaroman27@hotmail.com

DIRECTORA: ING. MERCEDES VILLACÍS TRONCOSO, MSc.
mercedes.villacis@epn.edu.ec

TOMO I

Quito, enero 2020

DECLARACIÓN

Nosotros, Cristhian Abel Licuy Ordóñez, Karina Elizabeth Román Solórzano, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por su normativa institucional vigente.

Cristhian A. Licuy Ordóñez

Karina E. Román Solórzano

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Cristhian Abel Licuy Ordóñez y Karina Elizabeth Román Solórzano, bajo mi supervisión.

ING. MERCEDES VILLACÍS, MSc
DIRECTORA DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la vida, los ánimos y la salud para poder cumplir una meta más en mi vida profesional.

A mis padres Maribel Ordoñez y Abel Licuy quienes me han brindado su amor y apoyo incondicional durante toda mi vida, gracias por los consejos y por exigirme constantemente para ser una persona de bien y con confianza en mí mismo.

A mi querida compañera de vida Gabriela Andrade quien desde que la conocí supo ser mi soporte e inspiración para imponerme metas y conseguirlas con éxito, gracias por acompañarme en los momentos más tristes y alegres, la amo.

A mis suegros Pedro Andrade y Fanny Ludeña por ayudarme tanto en momentos difíciles sin esperar nada a cambio.

A mis apreciados hermanos Ronny y Mayerly, mis compañeros de juegos, que siempre han creído en mí, ustedes son parte importante de esto.

A la Ing. Mercedes Villacís y a todos quienes conforman la familia del LEMSUR, quienes con su fundamental apoyo nos permitieron llevar a cabo nuestro trabajo de titulación.

A mi compañera de Tesis, Kari. Por hacer posible conmigo que este trabajo se lleve a cabo de la mejor manera, por la paciencia y talento que supiste entregar.

A mis estimados amigos y hermanos de carrera, los "Topitos": Byron C., Jonathan P, Héctor C., Jefferson Y., María José G. y Alexis M. con quienes pasamos muchas adversidades, pero siempre supimos darnos la mano y lograr superar muchos retos.

Por último, agradecer a toda mi familia y personas que me conocen y que hemos tenido la oportunidad de coincidir, gracias por su amistad.

Cristhian Abel Licuy Ordoñez

AGRADECIMIENTO

A Dios, mi amigo y compañero que ha llenado mi vida de dichas, a pesar que, yo le he fallado.

A mi querida Poli, por acogerme en sus instalaciones y permitirme llegar a formar parte de esta hermosa carrera, gracias por imponerme retos personales y profesionales.

A mis padres, Luis y Uvaldina quienes han sido un gran ejemplo de esfuerzo, honestidad, humildad, responsabilidad y abnegación por su familia. Gracias por todos sus consejos, amor y correcciones que han llevado a ser a cada uno de sus hijos personas de bien.

A mis hermanos, Paola, Galo, Daniel y Luis. Gracias por caminar a mi lado, brindarme su apoyo y ánimos que me han ayudado a finalizar mi carrera. A mis sobrinos, Mathias y Dominick, por llenar mi vida de alegrías, risas y golosinas.

A la Ing. Mercedes Villacís, directora del proyecto de titulación, por habernos brindado la oportunidad de participar en su proyecto y su predisposición para la guía y realización de esta tesis. Gracias por todo su afecto y enseñanzas.

Al Ing. Germán Luna, por haber compartido sus conocimientos durante algunos semestres en la carrera, por brindarme su cariño, consejos, bromas y reprimendas. Gracias por ser para mí, más que un profesor, un amigo invaluable.

Al personal del LEMSUR, quienes nos permitieron usar las instalaciones y equipos del laboratorio para la ejecución de toda la fase experimental.

A mi compañero de tesis, Cris, gracias por tu voluntad y compromiso para llegar a culminar nuestra meta.

A mis amiguitos, Erik Castro y Evelyn Guevara. Gracias por brindarme su amistad sincera e incondicional.

Karina Elizabeth Román Solórzano

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis Padres Abel Licuy y Maribel Ordóñez
por todo su apoyo incondicional, durante toda mi vida.

A mi amada esposa Gabriela Andrade, quien es mi fortaleza y guía.

A mis fabulosos hermanos Ronny y Mayerly, por estar conmigo y escucharme
siempre

Cristhian Abel Licuy Ordóñez

DEDICATORIA

A mis amados padres, Luis Román y Uvaldina Solórzano, por brindarme su amor
y apoyo incondicional.

A mis hermanos Paola, Galo, Daniel y Luis, por todo su cariño y consejos cuando
más lo he necesitado.

A mis angelitos Carolina y Felipe, por ser mis guías y darme fortaleza.

A mis pequeños sobrinos Mathias y Dominick, por llenar mi vida de alegría.

Karina Elizabeth Román Solórzano

CONTENIDO

| | |
|-----------------------------------|------|
| DECLARACIÓN | I |
| CERTIFICACIÓN | II |
| AGRADECIMIENTO | III |
| AGRADECIMIENTO | IV |
| DEDICATORIA | V |
| DEDICATORIA | VI |
| CONTENIDO | VII |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | XI |
| ÍNDICE DE FIGURAS | XV |
| ÍNDICE DE GRÁFICOS | XVII |
| ÍNDICE DE ECUACIONES..... | XX |
| RESUMEN | I |
| ABSTRACT | II |
| PRESENTACIÓN..... | III |
| CAPÍTULO 1 | 1 |
| GENERALIDADES | 1 |
| 1.1 INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.2 OBJETIVOS | 2 |
| 1.2.1 OBJETIVO GENERAL | 2 |
| 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 2 |
| 1.3 JUSTIFICACIÓN | 3 |
| 1.3.1 TEÓRICA | 3 |
| 1.3.2 METODOLÓGICA | 3 |

| | | |
|-------|---|----|
| 1.3.3 | PRÁCTICA..... | 4 |
| 1.4 | ALCANCE..... | 4 |
| 1.5 | ORIGEN DE LAS MUESTRAS DE ARCILLA..... | 4 |
| 1.5.1 | UBICACIÓN GEOGRÁFICA | 5 |
| 1.5.2 | DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA Y GEOMORFOLÓGICA..... | 6 |
| 1.6 | ORIGEN DE LAS MUESTRAS DE CENIZA VOLCÁNICA (CV) | 7 |
| 1.6.1 | UBICACIÓN GEOGRÁFICA | 7 |
| 1.6.2 | ANTECEDENTES DEL VOLCÁN TUNGURAHUA | 8 |
| 1.6.3 | ACTIVIDAD ERUPTIVA | 8 |
| 1.6.4 | DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA Y GEOMORFOLÓGICA..... | 10 |
| 1.7 | ORIGEN DE LAS MUESTRAS DE CASCARILLA DE ARROZ (CCA)..... | 11 |
| | CAPÍTULO 2 | 13 |
| | MARCO TEÓRICO | 13 |
| 2.1 | ARCILLAS EXPANSIVAS..... | 13 |
| 2.1.1 | DEFINICIÓN | 15 |
| 2.1.2 | CARACTERIZACIÓN DE ARCILLAS EXPANSIVAS..... | 15 |
| 2.1.3 | MINERALOGÍA DE ARCILLAS EXPANSIVAS | 16 |
| 2.1.4 | EFFECTOS DE SUELOS EXPANSIVOS EN SUBESTRUCTURA Y ESTRUCTURAS | 21 |
| 2.2 | CENIZA VOLCÁNICA (CV) | 23 |
| 2.2.1 | PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LA CV..... | 23 |
| 2.2.2 | ESTRUCTURA MINERAL DE LA CV | 24 |
| 2.3 | CENIZA DE LA CASCARILLA DE ARROZ (CCA) | 24 |
| 2.3.1 | PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LA CCA..... | 25 |

| | | |
|--|--|----|
| 2.3.2 | ESTRUCTURA MINERAL CCA..... | 25 |
| 2.4 | ESTABILIZACIÓN DE SUELOS EXPANSIVOS | 26 |
| 2.4.1 | GENERALIDADES | 26 |
| 2.4.2 | MÉTODOS TRADICIONALES DE ESTABILIZACIÓN | 26 |
| 2.4.3 | CRITERIO DE DOSIFICACIÓN DE ARCILLA EXPANSIVA CON PUZOLANA DE LA CV Y CCA | 29 |
| CAPÍTULO 3 | | 31 |
| MUESTREO Y PREPARACIÓN DE MUESTRAS Y ENSAYOS | | 31 |
| 3.1 | MUESTREO DEL SUELO EXPANSIVO | 31 |
| 3.2 | MUESTREO DE LA CV..... | 32 |
| 3.3 | PREPARACIÓN DE LA PUZOLANA DE CCA | 33 |
| 3.4 | PREPARACIÓN DE LA PUZOLANA DE CV | 34 |
| 3.5 | DOSIFICACIONES DE LAS MEZCLAS | 34 |
| 3.6 | ENSAYOS EN MUESTRAS NATURALES DE ARCILLAS | 35 |
| 3.6.1 | ENSAYOS FÍSICOS | 36 |
| 3.6.2 | ENSAYOS MECÁNICOS..... | 55 |
| 3.7 | MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO..... | 63 |
| 3.8 | ENSAYOS EN MUESTRAS DE ARCILLA ESTABILIZADA | 65 |
| 3.8.1 | ENSAYOS FÍSICOS | 65 |
| 3.8.2 | ENSAYOS MECÁNICOS..... | 73 |
| CAPÍTULO 4 | | 78 |
| ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES | | 78 |
| 4.1 | RESULTADOS DE MUESTRAS NATURALES Y MUESTRAS ESTABILIZADAS | 78 |
| 4.1.1 | LÍMITE LÍQUIDO | 78 |

| | | |
|--------------------------------------|--|--------------------------------------|
| 4.1.2 | LÍMITE PLÁSTICO | 79 |
| 4.1.3 | GRAVEDAD ESPECÍFICA | 80 |
| 4.1.4 | COMPACTACIÓN PRÓTOR MODIFICADO | 81 |
| 4.1.5 | PERMEABILIDAD | 81 |
| 4.1.6 | ÍNDICE DE EXPANSIÓN | 83 |
| 4.1.7 | CONSOLIDACIÓN | 84 |
| 4.1.8 | CORTE DIRECTO | 89 |
| 4.2 | ANÁLISIS COMPARATIVO DE MUESTRAS NATURALES Y MUESTRAS ESTABILIZADAS PARA DIFERENTES PORCENTAJES DE REEMPLAZO | 90 |
| 4.2.1 | LIMITE LÍQUIDO | 90 |
| 4.2.2 | LÍMITE PLÁSTICO | 91 |
| 4.2.3 | GRAVEDAD ESPECÍFICA | 93 |
| 4.2.4 | COMPACTACIÓN PRÓTOR MODIFICADO | 95 |
| 4.2.5 | ÍNDICE DE EXPANSIÓN | 98 |
| 4.2.6 | CONSOLIDACIÓN | 100 |
| 4.2.7 | CORTE DIRECTO | 104 |
| 4.2.8 | MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO | 107 |
| CAPÍTULO 5 | | 110 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | | 110 |
| 5.1 | CONCLUSIONES | 110 |
| 5.2 | RECOMENDACIONES | 113 |
| BIBLIOGRAFÍA | | 114 |
| ANEXOS | | ¡Error! Marcador no definido. |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| TABLA 1.1. COORDENADAS UTM PUNTOS DE MUESTREO DE SUELOS EN LA PROVINCIA DE MANABÍ..... | 5 |
| TABLA 1. 2. UBICACIÓN EN COORDENADAS UTM DEL OBSERVATORIO VULCANOLÓGICO DE TUNGURAHUA (OVT) | 7 |
| TABLA 1.3. CRONOLOGÍA DE ERUPCIONES MAYORES DEL VOLCÁN TUNGURAHUA. | 9 |
| TABLA 1. 4. UBICACIÓN EN COORDENADAS UTM DE LA PILADORA ANDRANGO. | 11 |
| TABLA 2. 1. PRINCIPALES TIPOS DE MINERALES. | 17 |
| TABLA 2. 2. PROPIEDADES MINERALES DE ARCILLA EXPANSIVA. | 18 |
| TABLA 2. 3. RECOMEDACIÓN DE CIMENTACIÓN A CONSTRUIR SEGÚN EL HINCHAMINETO O RETRACCIÓN DEL SUELO..... | 22 |
| TABLA 2. 4. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE LA CV..... | 24 |
| TABLA 2. 5. PROPIEDADES DE LA CCA. | 25 |
| TABLA 2. 6. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE LA CCA..... | 25 |
| TABLA 3. 1. UBICACIÓN EN COORDENADAS UTM DE LAS MUESTRAS A ESTABILIZAR..... | 32 |
| TABLA 3. 2. DOSIFICACIONES DE COMPOSICIÓN EN PESO DE PUZOLANA DE CCA Y CV. | 35 |
| TABLA 3. 3. CONTENIDO DE HUMEDAD DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5 NATURALES..... | 36 |
| TABLA 3. 4. LÍMITE LÍQUIDO DE MUESTRAS NATURALES. | 38 |
| TABLA 3. 5. LÍMITE PLÁSTICO DE MUESTRAS NATURALES..... | 39 |
| TABLA 3. 6. ÍNDICE PLÁSTICO DE MUESTRAS NATURALES | 40 |
| TABLA 3. 7. GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5. | 41 |
| TABLA 3. 8. GRANULOMETRÍA POR HIDRÓMETRO DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5. | 43 |

| | |
|---|----|
| TABLA 3. 9. ACTIVIDAD DE LAS ARCILLAS. | 44 |
| TABLA 3. 10. ACTIVIDAD DE MUESTRAS NATURALES..... | 44 |
| TABLA 3. 11. CLASIFICACIÓN SUCS DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5..... | 46 |
| TABLA 3. 12. GRAVEDAD ESPECÍFICA DE MINERALES MÁS IMPORTANTES. | 47 |
| TABLA 3. 13. GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5 | 48 |
| TABLA 3.14. CARACTERÍSTICAS DE LOS TIPOS DE COMPACTACIÓN PROCTOR..... | 49 |
| TABLA 3. 15. DENSIDAD SECA MÁXIMA Y HUMEDA ÓPTIMA DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5. | 50 |
| TABLA 3. 16. PERMEABILIDAD CON CARGA VARIABLE DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5. | 52 |
| TABLA 3. 17. CLASIFICACIÓN DEL ÍNCIDE DE EXPANSIÓN (EI). | 53 |
| TABLA 3. 18. ÍNDICE DE EXPANSIÓN DE LAS MUESTRAS DE ARCILLAS M3, M4 Y M5..... | 54 |
| TABLA 3. 19. DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE MUESTRAS NATURALES. | 54 |
| TABLA 3. 20. ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN DE LA MUESTRAS M3..... | 58 |
| TABLA 3. 21. ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN DE LA MUESTRAS M4..... | 59 |
| TABLA 3. 22. ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN DE LA MUESTRAS M5..... | 60 |
| TABLA 3. 23. ENSAYO DE CORTE DIRECTO DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5. | 63 |
| TABLA 3. 24. ANÁLISIS CON EL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO PARA MUESTRAS NATURALES..... | 64 |
| TABLA 3. 25. LÍMITE LÍQUIDO DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5 DOSIFICADAS..... | 66 |
| TABLA 3. 26. LÍMITE PLÁSTICO DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5 DOSIFICADAS..... | 67 |

| | |
|--|----|
| TABLA 3. 27. GRANULOMETRÍA POR LAVADO DE MUESTRAS M3 CON 10%, 20 Y 30% DE CCA Y CV | 68 |
| TABLA 3. 28. GRANULOMETRÍA POR LAVADO DE MUESTRAS M4 CON 10%, 20 Y 30% DE CCA Y CV | 68 |
| TABLA 3. 29. GRANULOMETRÍA POR LAVADO DE MUESTRAS M5 CON 10%, 20 Y 30% DE CCA Y CV | 69 |
| TABLA 3. 30. CLASIFICACIÓN SUCS DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5 DOSIFICADAS. | 70 |
| TABLA 3. 31. GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5 DOSIFICADAS..... | 71 |
| TABLA 3. 32. COMPACTACIÓN PRÓCTOR MODIFICADO DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5 DOSIFICADAS..... | 71 |
| TABLA 3. 33. PERMEABILIDAD CON CARGA CONSTANTE DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5 DOSIFICADAS..... | 72 |
| TABLA 3. 34. ÍNDICE DE EXPANSIÓN DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5 DOSIFICADAS..... | 73 |
| TABLA 3. 35. RESUMEN ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN DE MUESTRA M3 10%, 20% Y 30% | 74 |
| TABLA 3. 36. RESUMEN ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN DE MUESTRA M4 10%, 20% Y 30% | 75 |
| TABLA 3. 37. RESUMEN ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN DE MUESTRA M5 10%, 20% Y 30%..... | 76 |
| TABLA 3. 38. CORTE DIRECTO DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5 DOSIFICADAS..... | 77 |
| TABLA 4. 1. RESUMEN LÍMITE LÍQUIDO DE MUESTRAS NATURALES Y MUESTRAS ESTABILIZADAS. | 79 |
| TABLA 4. 2. RESUMEN LÍMITE PLÁSTICO DE MUESTRAS NATURALES Y MUESTRAS ESTABILIZADAS..... | 79 |
| TABLA 4. 3. RESUMEN GRAVEDAD ESPECÍFICA DE MUESTRAS NATURALES Y MUESTRAS ESTABILIZADAS..... | 80 |

| | |
|---|-----|
| TABLA 4. 4. RESUMEN COMPACTACIÓN PRÓCTOR MODIFICADO DE MUESTRAS NATURALES Y MUESTRAS ESTABILIZADAS..... | 81 |
| TABLA 4. 5. RESUMEN PERMEABILIDAD DE MUESTRAS NATURALES Y MUESTRAS ESTABILIZADAS..... | 82 |
| TABLA 4. 6. RESUMEN ENSAYO DE ÍNDICE DE EXPANSIÓN DE MUESTRAS NATURALES Y MUESTRAS ESTABILIZADAS..... | 83 |
| TABLA 4. 7. RESUMEN ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN DE MUESTRA M3 0%, 10%, 20% Y 30%..... | 86 |
| TABLA 4. 8. RESUMEN ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN DE MUESTRA M4 0%, 10%, 20% Y 30%..... | 87 |
| TABLA 4. 9. RESUMEN ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN DE MUESTRA M5 0%, 10%, 20% Y 30%..... | 88 |
| TABLA 4. 10. RESUMEN ENSAYO DE CORTE DIRECTO DE MUESTRAS NATURALES Y MUESTRAS ESTABILIZADAS..... | 89 |
| TABLA 4. 11. ESTADOS DE CARGA PARA EL ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN..... | 101 |
| TABLA 4. 12. ANÁLISIS EN EL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (100 μm)..... | 107 |
| TABLA 4. 13. ANÁLISIS EN EL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (20 μm)..... | 108 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 1.1. UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS | 6 |
| FIGURA 1.2. ESQUEMA GEOLÓGICO SIMPLIFICADO DEL VOLCÁN TUNGURAHUA. | 11 |
| FIGURA 1. 3. PROCEDENCIA DE LA CASCARILLA DE ARROZ | 12 |
| FIGURA 2. 1. PAÍSES CON PRESENCIA DE ARCILLAS EXPANSIVAS | 14 |
| FIGURA 2. 2. TETRAEDRO DE SÍLICE Y UNA LAMINA DE SÍLICE. | 19 |
| FIGURA 2. 3. AGRUPACIONES MOLECULARES DE LAS ARCILLAS..... | 19 |
| FIGURA 2. 4. ARCILLA MONTMORILLONITA, ESTADO DE VERACRUZ-MÉXICO. | 20 |
| FIGURA 2. 5. EXPANSIÓN DE UNA RED POR ADSORCIÓN DE MOLÉCULAS DE AGUA. | 20 |
| FIGURA 2.6. DESFASE DE TUBERÍAS. | 21 |
| FIGURA 2. 7. GRIETAS LONGITUDINALES EN PAVIMENTOS..... | 21 |
| FIGURA 2. 8. AGRIETAMINETO DE LA ESTRUCTURA POR MOVIMIENTO CÉNTRICO. | 21 |
| FIGURA 2. 9. AGRIETAMINETO DE LA ESTRUCTURA POR MOVIMIENTO PERIMETRAL. | 22 |
| FIGURA 3. 1. UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS A ESTABILIZAR..... | 31 |
| FIGURA 3. 2. LUGARES DE EXTRACCIÓN DE CENIZA VOLCÁNICA. | 33 |
| FIGURA 3. 3. CASCARILLA DE ARROZ Y PUZOLANA DE CCA..... | 33 |
| FIGURA 3. 4. CENIZA VOLCÁNICA Y PUZOLANA DE CV | 34 |
| FIGURA 3. 5. LIMITES DE ATTERBERG Y ESTADOS DEL SUELO..... | 37 |
| FIGURA 3. 6. ENSAYO DE LÍMITE LÍQUIDO. | 38 |
| FIGURA 3. 7. ENSAYO DE LÍMITE PLÁSTICO | 39 |
| FIGURA 3. 8. CURVA GRANULOMÉTRICA | 41 |
| FIGURA 3. 9. CARTA DE CLASIFICACIÓN SUCS | 45 |
| FIGURA 3. 10. CARTA DE PLASTICIDAD | 46 |
| FIGURA 3. 11. ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA..... | 48 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 3. 12. CURVA DE COMPACTACIÓN DE SUELOS. | 49 |
| FIGURA 3. 13. ENSAYO DE COMPACTACIÓN. | 50 |
| FIGURA 3. 14. ENSAYO DE PERMEABILIDAD DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5. | 52 |
| FIGURA 3. 15. ENSAYO DE ÍNDICE DE EXPANSIÓN..... | 53 |
| FIGURA 3. 16. ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5. | 56 |
| FIGURA 3. 17. ETAPAS DE LA CONSOLIDACIÓN DE UN SUELO PARA UN INCREMENTO PARTICULAR DE CARGA..... | 57 |
| FIGURA 3. 18. ENVOLVENTE DE FALLA DE MOHR COULOMB..... | 61 |
| FIGURA 3. 19. ENSAYO DE CORTE DIRECTO DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5. | 62 |
| FIGURA 3. 20. MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO | 64 |

ÍNDICE DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| GRÁFICO 4. 1. TENDENCIA DE LA DISMINUCIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO (LL) EN FUNCIÓN DEL %REEMPLAZO DE CCA Y CV - MUESTRA M3. | 90 |
| GRÁFICO 4. 2. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO (LL) EN FUNCIÓN DEL %REEMPLAZO DE CCA Y CV - MUESTRAS M3, M4 Y M5 | 91 |
| GRÁFICO 4. 3. TENDENCIA DE LA VARIACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO (LP) EN FUNCIÓN DEL %REEMPLAZO DE CCA Y CV - MUESTRA M3, M4 Y M5. | 92 |
| GRÁFICO 4. 4. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO (LP) EN FUNCIÓN DEL %REEMPLAZO DE CCA Y CV - MUESTRAS M3, M4 Y M5. | 93 |
| GRÁFICO 4. 5. TENDENCIA DE LA VARIACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA (Gs) EN FUNCIÓN DEL %REEMPLAZO DE PUZOLANA CCA Y CV - MUESTRA M3, M4 Y M5. | 94 |
| GRÁFICO 4. 6. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA (Gs) EN FUNCIÓN DEL %REEMPLAZO DE PUZOLANA CCA Y CV - MUESTRA M3, M4 Y M5. | 95 |
| GRÁFICO 4. 7. VARIACIÓN DE LA DENSIDAD MÁXIMA SECA Y HUMEDAD ÓPTIMA EN FUNCIÓN DEL %REEMPLAZO DE CCA Y CV - MUESTRA M3 | 96 |
| GRÁFICO 4. 8. VARIACIÓN DE LA DENSIDAD MÁXIMA SECA Y HUMEDAD ÓPTIMA EN FUNCIÓN DEL %REEMPLAZO DE CCA Y CV - MUESTRA M4. | 96 |
| GRÁFICO 4. 9. VARIACIÓN DE LA DENSIDAD MÁXIMA SECA Y HUMEDAD ÓPTIMA EN FUNCIÓN DEL %REEMPLAZO DE CCA Y CV - MUESTRA M5. | 97 |

| | |
|--|-----|
| GRÁFICO 4. 10. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE LA DENSIDAD SECA MÁXIMA (γ_d máx) EN FUNCIÓN DEL %REEMPLAZO DE PUZOLANA DE CCA Y CV - MUESTRAS M3, M4 Y M5 | 97 |
| GRÁFICO 4. 11. TENDENCIA DE LA VARIACIÓN DEL ÍNDICE DE EXPANSIÓN (EI) EN FUNCIÓN DEL %REEMPLAZO DE PUZOLANA DE CCA Y CV - MUESTRAS M3, M4 Y M5 | 99 |
| GRÁFICO 4. 12. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE LA VARIACIÓN DEL ÍNDICE DE EXPANSIÓN (EI) EN FUNCIÓN DEL %REEMPLAZO DE CCA Y CV - MUESTRAS M3, M4 Y M5 | 99 |
| GRÁFICO 4. 13. TENDENCIA DE LA VARIACIÓN DE LA PRESIÓN DE PRECONSOLIDACIÓN EN FUNCIÓN DEL %REEMPLAZO DE PUZOLANA DE CCA Y CV - MUESTRAS M3, M4 Y M5. | 100 |
| GRÁFICO 4. 14. COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN - MUESTRA M3 - CON 10%, 20% Y 30% DE PUZOLANA DE CCA Y CV | 101 |
| GRÁFICO 4. 15. COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN - MUESTRA M4 - 10%, 20% Y 30% DE PUZOLANA DE CCA Y CV | 102 |
| GRÁFICO 4. 16. COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN - MUESTRA M5 - 10%, 20% Y 30% DE PUZOLANA DE CCA Y CV | 102 |
| GRÁFICO 4. 17. RELACIÓN DE VACÍOS MUESTRA M3 - 10%, 20% Y 30% DE PUZOLANA DE CCA Y CV. | 103 |
| GRÁFICO 4. 18. RELACIÓN DE VACÍOS MUESTRA M4 - 10%, 20% Y 30% DE PUZOLANA DE CCA Y CV. | 103 |
| GRÁFICO 4. 19. RELACIÓN DE VACÍOS MUESTRA M5 - 10%, 20% Y 30% DE PUZOLANA DE CCA Y CV. | 104 |
| GRÁFICO 4. 20. VARIACIÓN DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN ϕ (°) EN FUNCIÓN DEL %REEMPLAZO DE PUZOLANA DE CCA Y CV - MUESTRAS M3, M4 Y M5 | 105 |
| GRÁFICO 4. 21. PORCENTAJE DE INCREMENTO DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN ϕ (°) EN FUNCIÓN DEL %REEMPLAZO DE PUZOLANA CCA Y CV - MUESTRAS M3, M4 Y M5 | 106 |

| | |
|--|-----|
| GRÁFICO 4. 22. VARIACIÓN DE LA COHESIÓN c (kg/cm ²) EN FUNCIÓN DEL %REEMPLAZO DE PUZOLANA DE CCA Y CV - MUESTRAS M3. M4 Y M5. | 106 |
|--|-----|

ÍNDICE DE ECUACIONES

| | |
|---|----|
| ECUACIÓN 3. 1. CONTENIDO DE HUMEDAD..... | 36 |
| ECUACIÓN 3. 2. ACTIVIDAD DE LAS ARCILLAS | 43 |
| ECUACIÓN 3. 3. COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD. | 44 |
| ECUACIÓN 3. 4. COEFICIENTE DE GRADACIÓN. | 45 |
| ECUACIÓN 3.5. COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD O CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA..... | 51 |
| ECUACIÓN 3. 6. ESFUERZO CORTANTE. | 61 |

RESUMEN

El proyecto técnico-experimental muestra la estabilización de suelos de alto potencial expansivo, mediante el uso de dos puzolanas naturales provenientes de la ceniza volcánica y de la ceniza de la cascarilla de arroz. Para este estudio fueron seleccionadas tres diferentes muestras de suelo originarias de la provincia de Manabí con las cuales se obtuvieron resultados muy satisfactorios.

Con la utilización de estas dos puzolanas naturales se logró disminuir el potencial de cambio volumétrico de arcillas expansivas. Para llevar a cabo este análisis, se llevaron a cabo ensayos físicos y mecánicos de laboratorio: contenido de humedad, clasificación SUCS, gravedad específica, compactación de suelos, permeabilidad, índice de expansión, consolidación y corte directo en muestras en estado natural y con dosificaciones al 10%, 20% y 30% de puzolanas de ceniza volcánica y ceniza de la cascarilla de arroz en composiciones iguales. Además, se realizó un análisis de la estructura del suelo con el microscopio electrónico de barrido (SEM), para evidenciar la morfología de las arcillas.

Las partículas de puzolana en contacto agua funcionan como un cementante, y que, adicionalmente con la compactación permiten reducir el efecto de cambio volumétrico que poseen los suelos con características expansivas.

Acorde con los resultados conseguidos en todos los ensayos se ha podido constatar que con el 20% de reemplazo de puzolanas se alcanza los resultados óptimos de estabilización. Con el empleo de estas puzolanas naturales se puede reducir entre 34% al 62% el valor del índice de expansión.

Finalmente, el uso de estas puzolanas naturales puede estabilizar suelos que posean características expansivas.

ABSTRACT

The present study shows the stabilization of soils with high expansive potential, using two natural pozzolans from volcanic ash and rice husk ash. Three different soil samples were selected from the province of Manabí with which very satisfactory results were obtained. With the use of these two natural pozzolans the potential of volumetric change of expansive clays was reduced. To carry out this analysis, some physical and mechanical laboratory tests were carried out: such as moisture content, SUCS classification, specific gravity, soil compaction, permeability, expansion index, consolidation and direct cut in samples in their natural state and with the dosages of 10%, 20% and 30% of pozzolans of volcanic ash and rice husk ash in equal compositions. In addition, an analysis of the soil structure with scanning electron microscope was performed to show the distribution of the particles. Pozzolan particles in contact with water act as a cementitious agent, which, in addition to compaction, reduce the effect of volumetric change in these soils. Based on the results obtained in all the tests, it has been possible to verify that with the 20% replacement of pozzolans the optimum stabilization results are reached, reducing the expansion index value between 34% and 62%. Therefore, the use of these natural pozzolans is an alternative method for the stabilization of soils that have characteristics.

PRESENTACIÓN

El trabajo teórico-experimental desarrollado corresponde a un enfoque cuantitativo y cualitativo, y se fundamenta en la interpretación de resultados experimentales, los que se obtuvieron de una fase empírica previa con suelo expansivo natural y suelo estabilizado con puzolanas de ceniza volcánica (CV) y ceniza de la cascarilla de arroz (CCA). En la etapa preliminar, se efectuó la toma de siete muestras de suelos expansivos en la provincia de Manabí, de las cuales se seleccionaron tres de ellas, las cuales después de una serie de ensayos como: difracción de rayos X, índice de actividad de arcillas, e índice de expansión; se categorizaron como arcillas expansivas. Las composiciones de arcilla-puzolanas y ensayos a realizarse para su estabilización fueron establecidos según la recopilación de información relacionada con la estabilización de arcillas expansivas, tales como: proyectos de investigación, proyectos técnicos-experimentales y publicaciones. Se efectuaron ensayos físicos y mecánicos para las tres muestras de arcilla y para cada combinación de porcentaje en peso de las puzolanas.

El estudio se compone de los siguientes capítulos, en donde se explican las diferentes fases realizadas.

Capítulo 1. Generalidades. En esta parte se presenta una introducción acerca de los objetivos, la justificación, importancia y el alcance del estudio de estabilización de suelos expansivos. De igual manera, se explica la descripción de la zona de estudio, el origen (geología, geomorfología y ubicación geográfica) de las muestras de arcilla, la puzolana de CCA y la puzolana de CV que fueron utilizadas en el estudio.

Capítulo 2. Marco Teórico. Se expone sobre las propiedades de las arcillas expansivas, su ubicación a nivel global, caracterización mineralógica y estructura. Además, las consecuencias de los efectos de este tipo de suelo sobre las subestructuras y estructuras. También se habla de los beneficios de la estabilización de suelos y los diferentes métodos tradicionales de estabilización, adicionalmente de los beneficios del uso de las puzolanas naturales como de

CCA y de CV. Finalmente, se define el criterio de dosificación para el reemplazo de arcilla por puzolana con el fin estabilizar el suelo.

Capítulo 3. Muestreo y Preparación de Muestras y Ensayos. En esta sección se presenta la metodología de muestreo de las arcillas expansivas, de la obtención de las puzolanas de CCA y CV, así como las dosificaciones de las mezclas de puzolana que se usan en el estudio. En la parte final del capítulo se expone los resultados de los diferentes ensayos físicos y mecánicos con muestras de suelo natural seleccionadas (M3, M4, M5) y dosificadas con el reemplazo del 10, 20 y 30% de puzolana.

Capítulo 4. Análisis de Resultados Experimentales. Analiza los resultados de los ensayos de laboratorio efectuados con suelo natural y suelo dosificado con el fin de contrastar los resultados y verificar si la metodología propuesta en este trabajo es efectiva y logra cumplir con todas las características de estabilización.

Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones. Finalmente, se emiten conclusiones y recomendaciones que deja el presente estudio teórico-experimental.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

Ecuador posee una gran variedad de tipos de suelos, los cuales que tienen sus propias características físicas y mecánicas. Los suelos expansivos se localizan, en su mayoría, en la región litoral y amazónica, estos suelos son arcillas plásticas con un alto contenido de minerales arcillosos como la caolinita, illita y montmorillonita; y presentan grandes cambios volumétricos, con un comportamiento cíclico de contracción y expansión, cuando su contenido de agua se incrementa o disminuye (Moreno & Rodríguez, 2013).

La zona de estudio será la provincia de Manabí, específicamente las localidades: Rocafuerte y Tosagua, que se han caracterizado por la presencia de arcillas expansivas, las que han desencadenado inconvenientes sociales y económicos a los pobladores.

La presencia de estos suelos provoca daños en obras civiles existentes, por ejemplo, en lugares donde se han edificado, casas, edificios, hospitales e infraestructura vial, especialmente, generando problemas a nivel de cimentaciones debido a la falta de exploración previa, estudio y tratamiento del suelo (Brooks, 2009).

Las arcillas expansivas, al no presentar las adecuadas características físicas y mecánicas, requieren ciertos tratamientos para la mejora de sus propiedades físico-mecánicas. Para estos casos se dispone actualmente de diferentes productos, los más empleados son los cementos, cales (Ganta, 2017), polímeros y puzolanas de origen natural (Cheng, y otros, 2018). Para estabilizar un suelo se requiere de la aplicación de procedimientos que alteren sus propiedades naturales, consiguiendo una mejora en el comportamiento resistente del material,

incrementando o protegiendo sus características mecánicas, cambio volumétrico, permeabilidad, entre otras (Cheng, y otros, 2018).

Se han realizado estudios de estabilización de estas arcillas utilizando la puzolana de la ceniza volcánica (CV) (Buitrón & Enríquez, 2018) y otro estudio usando puzolana de la ceniza de la cascarilla de arroz (CCA) (Chicaiza & Oña, 2018) en porcentajes de sustitución de arcilla por puzolana en 10, 20 y 30%

Por lo tanto, para este estudio y con la finalidad de analizar recursos naturales disponibles en Ecuador, se efectuará la investigación de estabilización de este tipo de suelos expansivos con dos puzolanas provenientes de CV y de CCA, en proporciones iguales, con las mismos porcentajes de sustitución en peso (10, 20 y 30) %, con el fin de mejorar su resistencia, permeabilidad, índice de expansión, trabajabilidad y la permanencia de estas propiedades en el tiempo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Estabilizar arcillas de características expansivas de las localidades: Rocafuerte y Tosagua de la provincia de Manabí, con puzolanas provenientes de la ceniza del volcán Tungurahua y ceniza de la cascarilla de arroz, en proporciones definidas.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el comportamiento físico y mecánico de muestras de arcilla expansiva combinadas con puzolanas de la ceniza volcánica y ceniza de la cascarilla de arroz, en un 10%, 20% y 30%, en proporciones iguales de puzolanas.
- Analizar la mejora de resistencia, permeabilidad e índice de expansión de especímenes de arcilla tratada, expuestas a condiciones de saturación.
- Observar la estructura microscópica de la arcilla expansiva en su estado natural y arcilla expansiva tratada, para comparar la disposición de las partículas.

- Elaborar un análisis comparativo de la compactación Proctor con muestra natural y muestra dosificada al 95% de Proctor modificado.

1.3 JUSTIFICACIÓN

1.3.1 TEÓRICA

Las arcillas expansivas representan un gran reto para la ingeniería civil, pues este tipo de suelos al adquirir humedad producen una presión de expansión que incide en la estabilidad volumétrica (Patrone & Prefumo, 2010). Estos cambios son considerados factores importantes que perjudican a las estructuras que se construyen sobre estos suelos (Rukenya, Wambua, Kabubo, & Thiong'o, 2016). De manera específica, se han seleccionado las localidades: Rocafuerte y Tosagua en la provincia de Manabí, para el estudio de este tipo de suelo. El estudio pretende proporcionar una nueva alternativa de estabilización de arcillas expansivas, con el fin de controlar los cambios volumétricos por presencia de humedad en este tipo de suelos, usando puzolanas de materiales de fácil disponibilidad en el medio como lo son: ceniza volcánica (CV) y ceniza de la cascarilla de arroz (CCA). Se presentarán resultados donde se verifique la disminución de los cambios de volumétricos del suelo, y por lo tanto su estabilización.

1.3.2 METODOLÓGICA

En el estudio se ejecutará diferentes ensayos físicos y mecánicos en las arcillas seleccionadas, utilizando especímenes compuestos de suelo y porcentajes de puzolanas de CCA y CV, que actúan como elementos que mejoran las propiedades físico-mecánicas y de estabilización (Chicaiza & Oña, 2018) y (Buitrón & Enríquez, 2018); los porcentajes definidos de reemplazo son: 10, 20 y 30%, los mismos que se obtuvieron de investigaciones recopiladas (Buitrón & Enríquez, 2018) y (Chicaiza & Oña, 2018), para llevar a cabo esta metodología se usarán ambas puzolanas para cada combinación, 50% de puzolana de CV y 50% de la puzolana de CCA. De esta manera se examinará el comportamiento del

suelo expansivo estabilizado en un rango establecido de variabilidad de composiciones.

1.3.3 PRÁCTICA

Debido a que el tipo de suelo juega un papel de vital importancia en el análisis sísmo-resistente de las estructuras, y si no se lo puede sustituir, se busca la estabilización y mejora de propiedades en aquellos suelos que presentan características desfavorables, para que el diseño cumpla con lo que establece la NEC-15. Mejorar el comportamiento de este tipo de suelos permitirá que las edificaciones y carreteras que se construyan sobre arcillas expansivas sean más seguras, atenuando los daños.

1.4 ALCANCE

El presente estudio analiza la estabilización de arcillas expansivas con la adición de puzolanas de origen natural. Para la estabilización de este tipo de suelos, se introducirá en su masa puzolanas de CCA y de CV en porcentajes definidos (10, 20 y 30), en proporciones iguales. Se analizará indicadores que permitan evaluar la estabilización, entre ellos, el cambio de características físicas y mecánicas entre el suelo natural y el modificado.

La utilización de porcentajes de dosificación definidos permitirá reproducir la metodología en otros especímenes de suelo con las mismas características, principalmente las de presión de expansión.

1.5 ORIGEN DE LAS MUESTRAS DE ARCILLA

Los suelos muestreados fueron un total de siete, procedentes de la provincia de Manabí, situada en la costa de Ecuador, específicamente de los cantones de Flavio Alfaro, Jama, San Vicente, Tosagua, Rocafuerte y Montecristi. Todos estos suelos contaban con características expansivas.

1.5.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

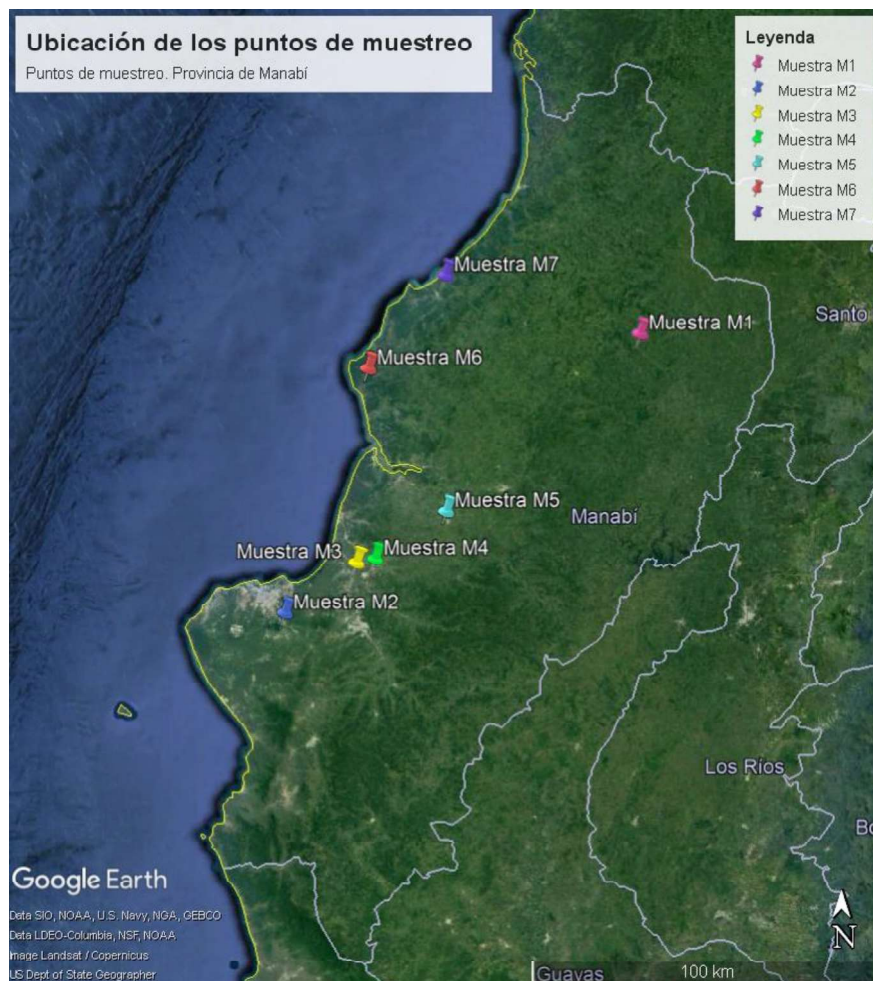
La ubicación geográfica de las siete extracciones de muestras de suelos se ilustra en la Tabla 1.1 y en la Figura 1.1.

TABLA 1.1. COORDENADAS UTM PUNTOS DE MUESTREO DE SUELOS EN LA PROVINCIA DE MANABÍ

| Muestra | Zona | LONGITUD | LATITUD |
|----------------|-------------|-----------------|----------------|
| 1 | 17 N | 638829.70 | 9962451.35 |
| 2 | 17 N | 537402.69 | 9883228.38 |
| 3 | 17 N | 557841.43 | 9897556.42 |
| 4 | 17 N | 563167.51 | 9898622.20 |
| 5 | 17 N | 583398.70 | 9912025.19 |
| 6 | 17 N | 561267.25 | 9952696.46 |
| 7 | 17 N | 583263.42 | 9979021.44 |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

FIGURA 1.1. UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS



Fuente: (Google Earth, 2019)

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

1.5.2 DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA Y GEOMORFOLÓGICA

La formación geológica de la provincia de Manabí está constituida de intercalaciones de limolitas lutitas macizas estratificadas y areniscas. En las fracturas hay presencia de vetas delgadas de yeso, existen también capas delgadas de s y dolomita. El miembro Dos Bocas y Villingota se unen formando un límite impermeable que sobresale casi en todo el borde de la faja oriental. (Acosta, 2015)

- **Dos Bocas.** - Ubicado sobre la formación de San Mateo, está constituido de limolitas, lutitas macizas de color café y arena, presenta gran cantidad de vetas de yeso y presencia de lentes dolomíticos (Burbano, Becerra, &

Pasquel, 2006). Surge en las riberas del Estero Guarango al suroeste de Rocafuerte y al oeste y sur de Picoazá (Burbano, Becerra, & Pasquel, 2006).

- **Villingota.** - Litológicamente está compuesta de lutitas tobáceas de color gris, blanco y café, con intercalaciones de areniscas amarillas, constituye la parte superior de la formación Tosagua. Las lutitas tienen escamas de peces, son frecuentemente fosfatadas. (Burbano, Becerra, & Pasquel, 2006)

1.6 ORIGEN DE LAS MUESTRAS DE CENIZA VOLCÁNICA (CV)

La ceniza volcánica se obtuvo en las cercanías del volcán Tungurahua. Precisamente, cerca del Observatorio Vulcanológico de Tungurahua (OVT) del IG EPN. Debido a la erupción del 14 de julio de 2013, en el lugar se encuentran varios depósitos de material piroclástico (Manosalvas, 2014).

El Observatorio del Volcán Tungurahua (OVT) está situado a 13 km del cráter del volcán en la población Guadalupe, este sitio es fundamental porque es donde se pueden recibir las lecturas de los instrumentos geofísicos de control colocados en los alrededores del Tungurahua (Manosalvas, 2014).

1.6.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

El sitio muestreo de la ceniza volcánica está ubicado en las cercanías del Observatorio Vulcanológico de Tungurahua (OVT) y pertenece a la quebrada llamada Achupashal.

TABLA 1. 2. UBICACIÓN EN COORDENADAS UTM DEL OBSERVATORIO VULCANOLÓGICO DE TUNGURAHUA (OVT)

| Zona | LONGITUD | LATITUD |
|------|----------|---------|
| 17 N | 778651 | 9849744 |

Fuente: (IG EPN, 2014)

1.6.2 ANTECEDENTES DEL VOLCÁN TUNGURAHUA

El Tungurahua es un estrato-volcán andesítico compuesto, ubicado en la Cordillera Real del Ecuador, 120 km al sur de Quito, 33 km al SE de Ambato y tan sólo a 8 km al Norte de la ciudad de Baños. Es un edificio volcánico de 5020 m de altura con un diámetro basal de 16 km. Hall et al. (1999) dividen a este volcán en tres edificios sucesivos, Tungurahua I, II y III, siendo el tercero el edificio actual. Los dos edificios anteriores sufrieron colapsos sectoriales hace 30 y 3 ka, cuyos depósitos de avalancha afloran en los valles de los ríos Chambo y Patate. La actividad del Tungurahua III habría comenzado con la emisión del gran flujo de lava de las Juntas hace aproximadamente 2300 años (Hall et al., 1999). Desde el año 1300 AD el Tungurahua ha producido erupciones con flujos piroclásticos, caídas de ceniza, flujos de lava y lahares, al menos una vez por siglo. (Le Pennec, y otros, 2008)

1.6.3 ACTIVIDAD ERUPTIVA

Actualmente hay un periodo eruptivo que inició desde el año 1999, al inicio la erupción fue intermitente con emisiones de ceniza y gases acompañadas de pequeñas explosiones. En el año 2006, por primera vez en este periodo se produjeron dos grandes erupciones que afectaron el lado este y sur este, por la formación de material piroclástico. (Manosalvas, 2014)

TABLA 1.3. CRONOLOGÍA DE ERUPCIONES MAYORES DEL VOLCÁN TUNGURAHUA.

| | |
|--|--|
| Años 1999 - 2005 d.C. | Erupción con explosiones y largos períodos de emisiones permanentes de ceniza, principalmente hacia el Oeste del volcán. Ver los detalles en el capítulo "el proceso eruptivo iniciado en el 1999" |
| Años 1916 a 1918 d.C. | Varias explosiones en 1918 producen flujos piroclásticos que viajan hacia Juive, Las Juntas, Cusua, El Manzano, y Vazcún (5 de abril 1918; ver la descripción detallada en el Anexo 3) |
| Año 1886 d.C. | Notable caída de pómez hacia el Occidente. Numerosos flujos piroclásticos bajan por los sectores de la Palma, río Patate, Yuibug |
| Año 1773 d.C. | Nubes ardientes descienden en los sectores de Cusúa-La Pirámide y en el valle de Vazcún. Provocan daños en la ciudad de Baños. Grandes lapilli caen en la región. |
| Año 1640 d.C. | Nubes ardientes descienden por todos los flancos del volcán (incluyendo el valle de Vazcún) y viajan aguas arriba en los ríos Patate y Chambo hasta 17km del cráter. Daños importantes en el sector y probables víctimas |
| Siglos XIV d.C. | Nubes ardientes bajan en los sectores de Mandur, Chontapamba, Yuibug. Un flujo de lava llega hasta el actual pueblo de Bilbao |
| Siglo VIII o IX d.C. | Grande caída de escoria gruesa hacia el Occidente. Las nubes ardientes llenan varias quebradas del sector de Chontapamba, Puela-Yuibug y llegan hasta Cahuaji. Posible flujo de lava en Chontapamba. Probables víctimas |
| Octavo siglo d.C. | Erupción mayor con una gran caída de pómez en todo el sector Occidental del volcán y hasta el Chimborazo. Grandes flujos piroclásticos en Vazcún, Las Juntas, Chontapamba, Yuibug etc. Los flujos también viajaron aguas arriba en los valles de los ríos de Patate y Chambo hasta 15-16 km del cráter. Víctimas muy probables |
| Séptimo siglo d.C. | Abundantes escorias, lapilli y cenizas caen en toda la región del volcán. Grandes flujos piroclásticos se emplazan en los sectores de Vazcún, Las Juntas, y en toda la parte Oeste y Sur-Oeste del edificio. |
| Entre el segundo siglo a.C. y Tercer siglo d.C. | Una caída de pómez cubre el sector Sur-Occidental del volcán, nubes ardientes muy móviles entran en los valles de los ríos Patate y Pastaza |
| Siglo III o IV a.C. | Grande caída de escoria hacia el Sur-Occidente del volcán. Voluminosos flujos piroclásticos viajan hasta Penipe y Matus |
| Primeros siglos del Primer Milenio a.C. | Potentes flujos de lava son emitidos. Uno llega al pie del volcán en el sector de Cusúa y sigue el río Chambo y Pastaza hasta la Pamba. Otro flujo sale de la planicie de Pondora, se acumulan en Juive Chico, y se extienden en el sector de Baños, siguiendo el río Pastaza hasta los sectores de Agoyan y Río Verde |
| Primero o segundo siglo del segundo milenio a.C. | Colapso de Tungurahua II como consecuencia de una intrusión de magma dacítico en el flanco Oeste del volcán. Explosión lateralmente dirigida y gran columna de pómez y ceniza. Existen evidencias de que el sector estaba bastante poblado. Víctimas muy probables. |

Fuente: (Le Pennec, y otros, 2008)

Estos eventos afectaron a varias ciudades de la región costa como Guayaquil. Desde esos eventos se presentan episodios subcontinuos de actividad que duran poco tiempo con pausas de hasta 3 meses. En la mayoría de los casos la actividad se reinicia con explosiones vulcanianas como en los años 2010, 2012 y 2013; o de tipo estromboliano con emisión continua de ceniza y gas. (Manosalvas, 2014)

1.6.4 DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA Y GEOMORFOLÓGICA

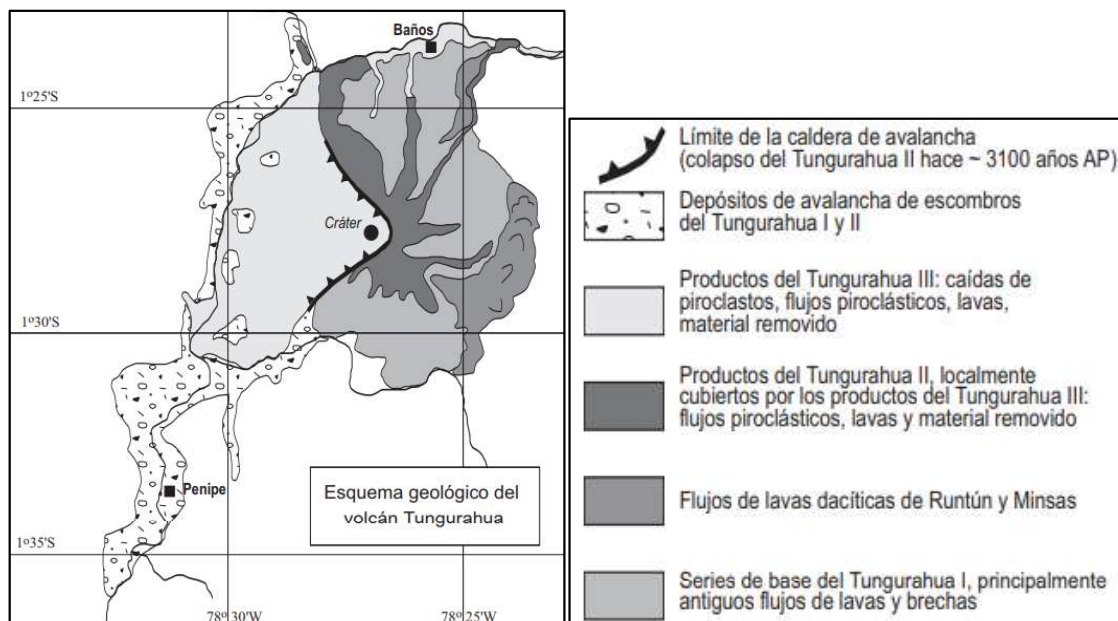
El IG EPN detalla la descripción geológica y geomorfológica del Volcán en su sitio.

El volcán Tungurahua consta de la edificación de tres volcanes sucesivos (Tungurahua I, II y III), debido a grandes deslizamientos los dos primeros fueron parcialmente destruidos. En los flancos norte, oriental y sur del volcán, se observa las señales de este antiguo período de actividad, que corresponde al Tungurahua I y II (ver Figura 1. 2). El edificio actual (Tungurahua III), se desarrolló hace 3100 años después del Tungurahua II. (Hall, Robin, Beate, Mothes, & Monzier, 1999) (Manosalvas, 2014)

Hoy en día se han realizado varias investigaciones con respecto al Tungurahua III que han contribuido en el conocimiento de su historia eruptiva.

El método del carbono 14, ha permitido probar que el Tungurahua III ha tenido al menos 16 erupciones con material piroclásticos, y que alrededor de 17 flujos de lava llegaron al pie del edificio (Hall, Robin, Beate, Mothes, & Monzier, 1999).

FIGURA 1.2. ESQUEMA GEOLÓGICO SIMPLIFICADO DEL VOLCÁN TUNGURAHUA.



Fuente: (Le Penec, y otros, 2005)

1.7 ORIGEN DE LAS MUESTRAS DE CASCARILLA DE ARROZ (CCA)

Las muestras de cascarilla de arroz se obtuvieron de la Piladora de Arroz Andrango, situada en el Recinto Cupa del Cantón Quinindé en la Provincia de Esmeraldas, véase en la Figura 1. 3 y en la Tabla 1.4.

TABLA 1. 4. UBICACIÓN EN COORDENADAS UTM DE LA PILADORA ANDRANGO.

| Zona | LONGITUD | LATITUD |
|------|-----------|----------|
| 17 N | 666980.00 | 41494.00 |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

FIGURA 1. 3. PROCEDENCIA DE LA CASCARILLA DE ARROZ

Fuente: (Google Earth, 2019)

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 ARCILLAS EXPANSIVAS

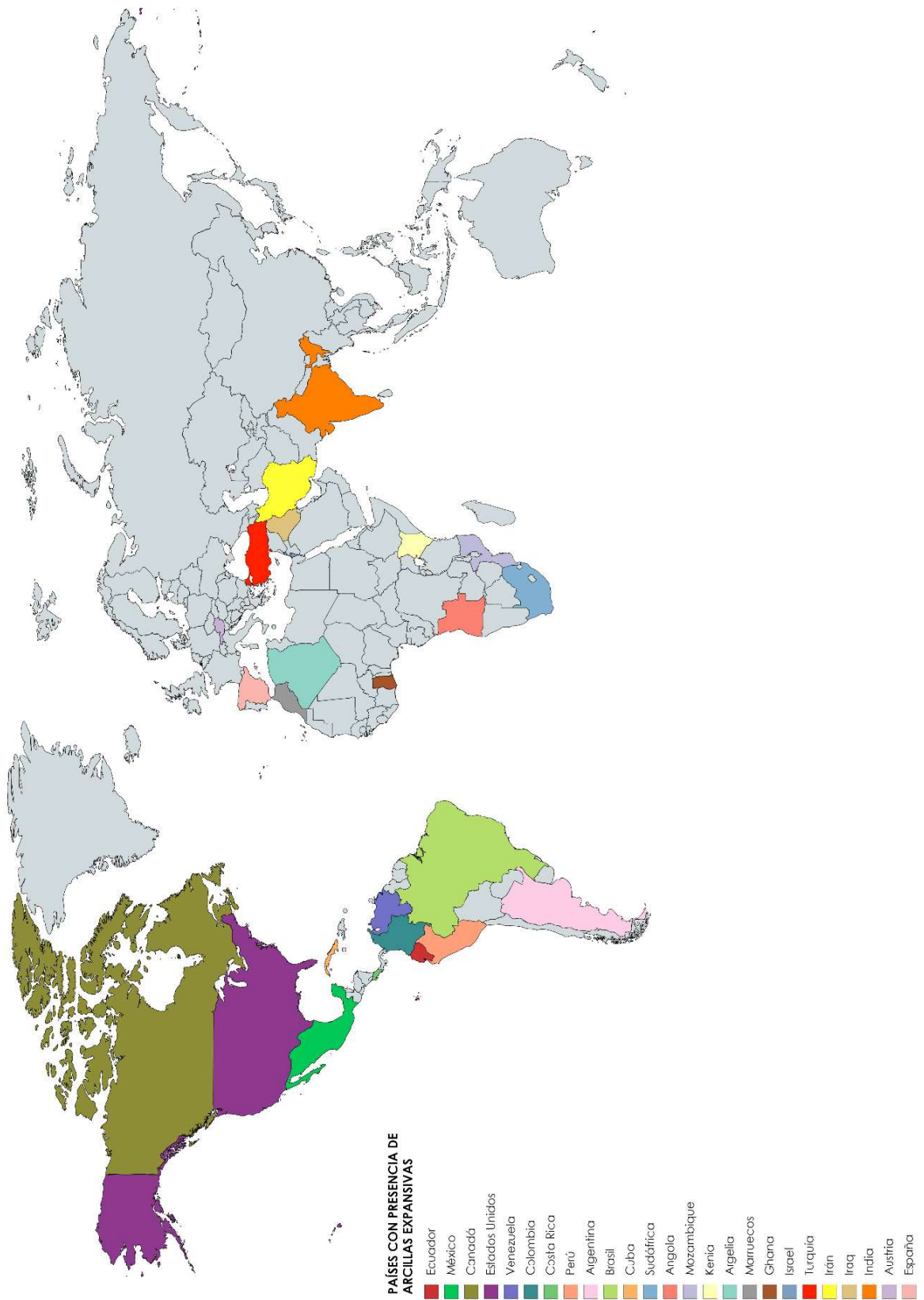
Los daños experimentados en las estructuras debido a la presencia de suelos expansivos no fueron identificados hasta finales de 1930 (Patrone & Prefumo, 2005).

Este tipo de suelo es común en: zonas tropicales, zonas con estaciones diferentes y zonas áridas. Los principales países en los cuales hay la presencia de los suelos expansivos se exponen en la Figura 2.1 (López Lara, 1995).

Se estima que los daños ocasionados en las construcciones que se encuentran sobre suelos expansivos son superiores a dos billones de dólares cada año (Patrone & Prefumo, 2005).

Actualmente, existen muchas metodologías para estabilizar suelos, cada método utiliza diferentes materiales estabilizadores, por ejemplo: cal, cemento Pórtland, ácidos orgánicos, resinas, polímeros, puzolanas, sales, etc. Inclusive se ha utilizado la mezcla de productos estabilizantes (Garnica, Pérez, Gómez, & Obil, 2002).

FIGURA 2. 1. PAÍSES CON PRESENCIA DE ARCILLAS EXPANSIVAS



Created with mapchart.net ©

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

2.1.1 DEFINICIÓN

Se conoce como suelos expansivos a aquellos que presentan cambios en su volumen; contracción y expansión, debido al incremento y disminución de la humedad, respectivamente (Sánchez , 2014). Al presentar esta alta facilidad de absorber agua, así como para perderla, hace que, este tipo de suelo sea muy inestable para la construcción.

Los suelos expansivos conforman un área de alrededor de 335 millones de hectáreas del territorio mundial (Can, Santamaría, & Canul, 2016).

2.1.2 CARACTERIZACIÓN DE ARCILLAS EXPANSIVAS

En el campo ingenieril es importante lograr identificar si un suelo tiene la facultad de expandirse o no. Los suelos con potencial expansivo podrán expandirse dependiendo de los cambios de humedad a los que esté sujeto (Arancibia , 2003).

A continuación, se mencionará diferentes características para identificar un suelo expansivo.

- **En laboratorio**

- a) Identificación mineralógica. - Los ensayos mineralógicos determinan la presencia de montmorillonita, que es un mineral predominante para producir expansión. La identificación mineralógica se puede realizar mediante los siguientes ensayos (Patrone & Prefumo, 2005):
 - Difracción de rayos X
 - Análisis químicos
 - Análisis de microscopio electrónico
- b) Determinación de propiedades de los suelos arcillosos. - Los siguientes ensayos son de fácil realización y disponibilidad de equipos en los laboratorios, sin embargo, no se cuantifica la expansión, pero se categoriza cualitativamente el potencial expansivo (Patrone & Prefumo, 2005).
 - Límites de Atterberg
 - Contenido de coloides
 - Expansión libre del suelo

- c) Métodos indirectos de determinación del potencial expansivo del suelo.
 - Se estima el potencial expansivo de manera cualitativa, tomando medidas directas de expansión a muestras remoldeadas bajo condiciones establecidas de densidad y humedad (Patrone & Prefumo, 2005).
 - Método de Ladd y Lambe
 - Medición del cambio de volumen
- d) Medidas directas de la expansión del suelo. - Consiste en aplicar diferentes condiciones de carga a un suelo saturado, con la finalidad de recopilar datos de deformación que serán graficadas junto con las variaciones de la presión. (Patrone & Prefumo, 2005).

- **En Campo**

- a) Suelos con colores gris oscuro, verdosos, azulados, rojo-café, anaranjado y con efectos brillantes o satinados al ser cortados.
- b) El suelo presenta notorios agrietamientos superficiales.
- c) El barro produce un efecto pegajoso en manos y calzado.
- d) Si es fácilmente moldeable con las manos sin presentar agrietamientos y después de varios días al secarse a temperatura ambiente presenta grietas anchas y profundas. (Salazar , 2005)

2.1.3 MINERALOGÍA DE ARCILLAS EXPANSIVAS

La arcilla y el humus presentes en los suelos expansivos son los encargados de controlar las propiedades físicas y químicas, alrededor de las cuales ocurren reacciones químicas y alteraciones en los nutrientes. Las arcillas poseen minerales cuya estructura química tiene forma laminar, la combinación de estas láminas da lugar a minerales como: caolinita, montmorillonita, illita, entre otros, véase en la Tabla 2.1 y Tabla 2.2. (Higuera, Gómez , & Pardo, 2012)


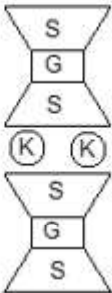
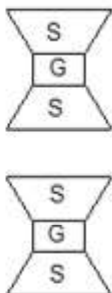
TABLA 2. 1. PRINCIPALES TIPOS DE MINERALES.

| GRUPO | MINERALES | TAMAÑO PROMEDIO | CARACTERÍSTICAS FÍSICAS PRINCIPALES |
|------------------|---|------------------|--|
| Arena muy fina | Cuarzo | $> 1\mu$ | Abrasiva, sin cohesión |
| Mica | Muscovita, biotita | $> 1\mu$ | Sin cohesión, se intemperiza fácilmente, compactable. |
| Carbonato | Calcita, dolomita | Variable | Se pulveriza fácilmente |
| Sulfato | Yeso | $> 1\mu$ | Ataca al cemento |
| Alófono | Aluminosilicatos amorfos, atapulgita, Alúmina y sílica hidratadas | $\approx 1\mu$ | Alta relación de vacíos, alta plasticidad. |
| Caolín | Caolinita y halloysita | $\approx 1\mu$ | No expansivo, baja plasticidad, baja cohesión |
| Illita | Illita y micas parcialmente degradadas | $\approx 0.1\mu$ | Expansiva, plasticidad media, baja permeabilidad. |
| Montmorillonita | Montmorillonita y Bentonita | ≤ 0.01 | Altamente expansiva, muy plástica, permeabilidad extremadamente baja |
| Clorita | Clorita, vermiculita | $\approx 0.1\mu$ | Expansión baja, resistencia al cortante baja |
| Materia orgánica | Presencia de ácido | Variable | Alta permeabilidad, difícilmente compactable, se puede degradar rápidamente por oxidación. |

Fuente: (Garnica, Pérez, Gómez , & Obil, 2002)

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

TABLA 2. 2. PROPIEDADES MINERALES DE ARCILLA EXPANSIVA.

| PROPIEDADES | MINERAL | | |
|---|---|--|---|
| | CAOLINITA | ILLITA | MONTMORILLONITA |
| Esquemas de la estructura |  |  |  |
| G= lámina de Gibbsita S= lámina de silicato K= ión de potasio | | | |
| Tamaño de las partículas | d=0.3 a 3 μ m e= 1/3 a 1/10 d | d=0.1 a 2 μ m e= 1/10 d | d=0.1 a 1 μ m e= 1/10 d |
| Superficie específica | 5 - 30 | 65 - 100 | 600 - 800 |
| Capacidad de intercambio catiónico por 100g de arcilla | 3 - 15 | 10 - 40 | 80 - 150 |
| Forma de la partícula | Aplanada | Aplanada | Aplanada |
| Expansión máxima para una presión de 0.1 t/p ² | despreciable | 350 | 1500 |
| Expansión máxima para una presión de 0.2 t/p ² | despreciable | 150 | 350 |

Fuente: (Bauzá, 2015)

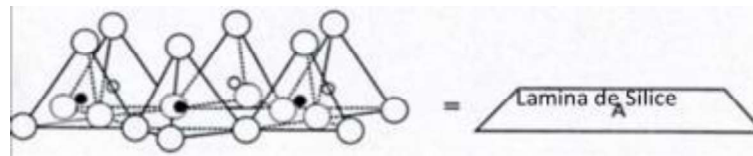
Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

Las agrupaciones moleculares se encuentran formadas por las láminas delgadas y unidades de malla pueden ser tetraédricas y octaédricas (Figura 2.2).

Las unidades de malla tetraédricas están formadas por: átomos de oxígeno a su alrededor y un ión de sílice en el centro.

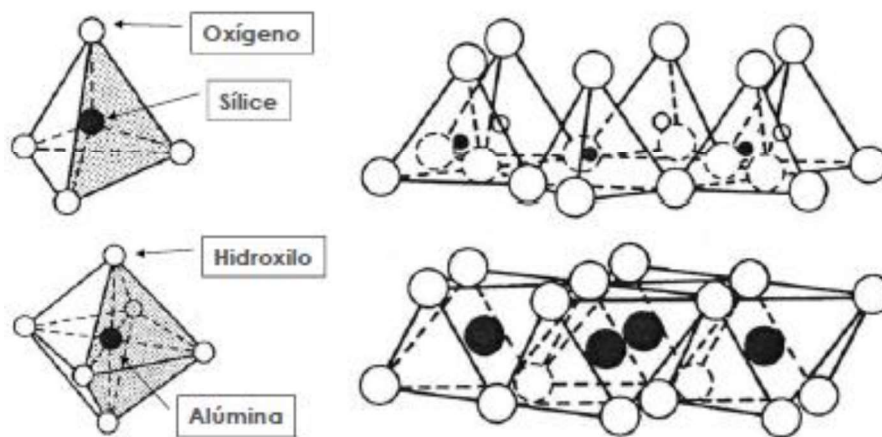
Las unidades de malla octaédricas están formadas por: hidróxilos a los alrededores y un átomo de aluminio en el centro.

FIGURA 2. 2. TETRAEDRO DE SÍLICE Y UNA LAMINA DE SÍLICE.



Fuente: (Oweis & Khera, 1998)

FIGURA 2. 3. AGRUPACIONES MOLECULARES DE LAS ARCILLAS.



Fuente: (Bauzá, 2015)

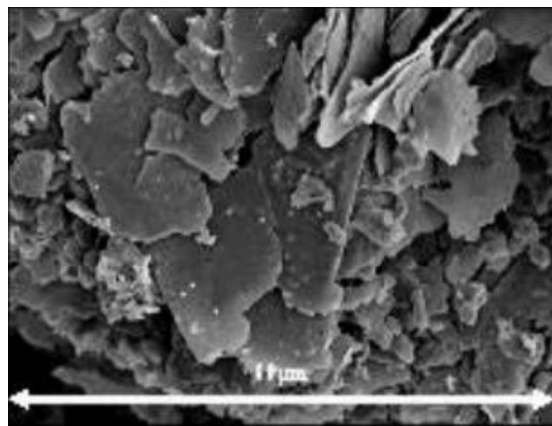
Los minerales de caolinita tienen una actividad superficial pequeña, están formados por una lámina silícica y otra de aluminio. La unión de las retículas es lo suficientemente fuerte que no permite el ingreso de agua. La forma de los granos también tiene una forma escamosa pero la caolinita no capta agua como lo hace la montmorillonita. Debido a esto, la caolinita no presenta efectos expansivos o de contracción al tener contacto con el agua (López, Hernández, Horta, Coronado, & Castaño, 2010).

Las arcillas, en cuya composición mineral se encuentra presente la montmorillonita (Figura 2.4) tienden a ser expansivas, ya que los espacios existentes entre las láminas pueden captar agua provocando la expansión del

suelo, esto se debe a que la unión entre las retículas del mineral es débil, como se observa en la Figura 2.5 (Higuera, Gómez , & Pardo, 2012).

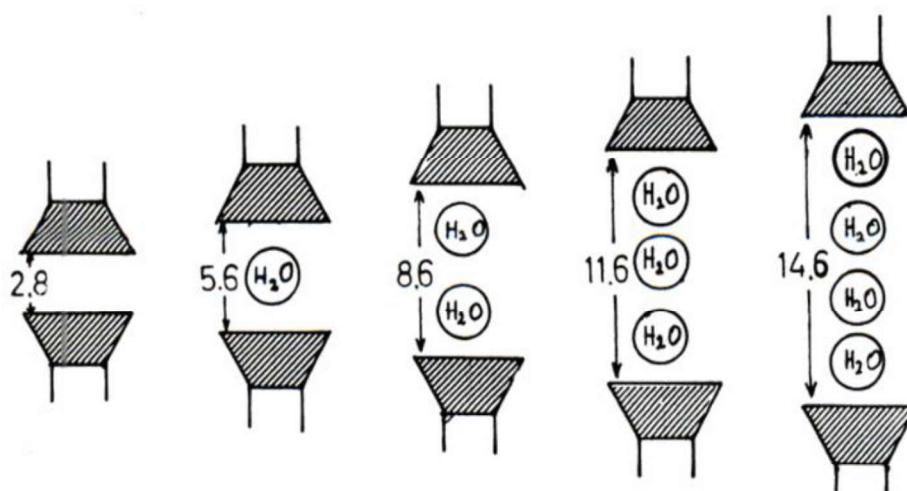
Las illitas, por lo general, se encuentran estructuradas por láminas al igual que las montmorillonitas, pero su constitución interna usualmente forma grumos de materia, por lo que su área expuesta al agua se reduce; y su potencial expansivo es menor que las montmorillonitas (Garnica, Pérez, Gómez , & Obil, 2002).

FIGURA 2. 4. ARCILLA MONTMORILLONITA, ESTADO DE VERACRUZ-MÉXICO.



Fuente: (Álvarez R. , 2011)

FIGURA 2. 5. EXPANSIÓN DE UNA RED POR ADSORCIÓN DE MOLÉCULAS DE AGUA.



Una molécula de agua tiene un diámetro aproximado de 3 Å

Fuente: (Besoain, 1985)

2.1.4 EFECTOS DE SUELOS EXPANSIVOS EN SUBESTRUCTURA Y ESTRUCTURAS

Debido a la variación de humedad en los suelos expansivos, se producen daños en las estructuras especialmente a las edificaciones ligeras como: casas, vertederos, muros y pavimentos (Moreno & Rodríguez, 2013).

- Daños en tuberías (Figura 2.6)
- Deformación y agrietamiento en pavimentos (Figura 2.7)
- Fisuración de elementos estructurales (Figura 2.8 y 2.9)
- Rotura de la cimentación.

FIGURA 2.6. DESFASE DE TUBERÍAS. DE FIGURA 2.7. GRIETAS LONGITUDINALES PAVIMENTOS.

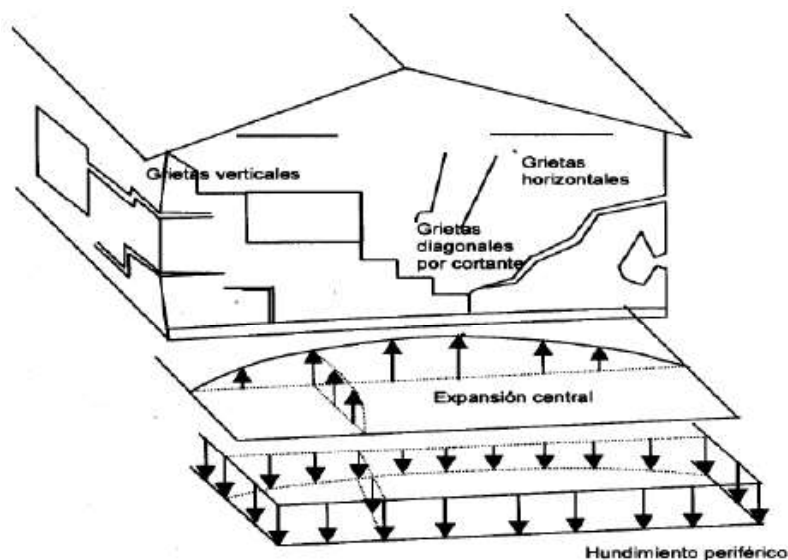


Fuente: (Álvarez & Díaz, 2011)



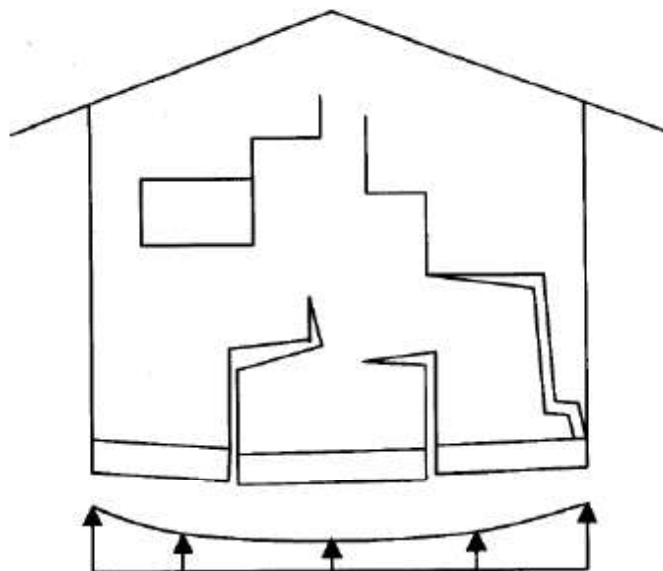
Fuente: (Álvarez & Díaz, 2011)

FIGURA 2.8. AGRIETAMIENTO DE LA ESTRUCTURA POR MOVIMIENTO CÉNTRICO.



Fuente: (Moreno & Rodríguez, 2013)

FIGURA 2. 9. AGRIETAMINETO DE LA ESTRUCTURA POR MOVIMIENTO PERIMETRAL.



Fuente: (Moreno & Rodríguez, 2013)

Según investigaciones realizadas por Jennings y Kerrich en África del Sur, recomiendan elegir el tipo de cimentación acorde al hinchamiento o retracción del suelo como se aprecia en la Tabla 2.3 (Llorca, 1980).

TABLA 2. 3. RECOMEDACIÓN DE CIMENTACIÓN A CONSTRUIR SEGÚN EL HINCHAMINETO O RETRACCIÓN DEL SUELO.

| Calidad del terreno | Hinchamiento / Retracción (mm) | Tipo de cimentación y otras medidas |
|---------------------|--------------------------------------|---|
| Excelente | 0 - 6 | Cimentación común |
| Bueno | 6 - 12 | Cimentación común, reforzada |
| Satisfactorio | 12 - 50 | Juntas de asiento más frecuentes de lo habitual |
| Malo | 50 - 100 | Cimentación con pilotes y muros armados |
| Muy malo | 0 - 100 | Cimentación con pilotes y base ensanchada |

Fuente: (Llorca, 1980)

2.2 CENIZA VOLCÁNICA (CV)

La ceniza volcánica está formada por roca y minerales de diámetros inferiores a dos milímetros. La ceniza se genera por el resquebrajamiento de rocas grandes en otras de menor dimensión durante una erupción volcánica incluyendo chorros de vapor de agua. Consecuentemente de la emisión de ceniza se forma un cono sobre el volcán que con ayuda del viento y de la gravedad tiende a cementarse hasta formar capas en el suelo que pueden llegar a lo largo de varios kilómetros (INPI, 2014).

La ceniza volcánica tiene repercusiones como: irritación en pulmones, ojos y piel, daños en la vegetación y la acumulación de ceniza sobre la cubierta de las estructuras puede ocasionar el colapso de las mismas (INPI, 2014).

2.2.1 PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LA CV

La ceniza volcánica puede presentar las siguientes propiedades y características.

- **Composición litológica y textural**
La composición y la forma de la ceniza determinan sus propiedades físicas y la relación entre el agua y el magma que se encuentran dentro del conducto del volcán o el borde del cráter (Guevara, 2015).
- **Albedo**
Es la reflectividad existente en una superficie respecto a la radiación que incide sobre la misma. En el caso de la ceniza volcánica, debido a su alta vascularidad y contenidos de vidrio de sílice en sus partículas aumenta, sustancialmente el albedo cuando la ceniza se encuentra en el cráter. El valor usual de albedo de la ceniza volcánica es de 7% (Guevara, 2015).
- **Tamaño de la partícula de ceniza**
El tamaño de las partículas se relaciona con la magnitud de la erupción volcánica, éstas pueden extenderse a una gran distancia dependiendo de la dirección del viento y del tamaño que tengan las partículas (Guevara, 2015).

2.2.2 ESTRUCTURA MINERAL DE LA CV

La ceniza del volcán Tungurahua está formada por los minerales expuestos en la Tabla 2.4.

TABLA 2. 4. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE LA CV.

| CENIZA VOLCÁNICA | | |
|--|--|------------|
| Mineral | | % |
| SiO ₂ | Óxido de silicio | 59.2 ± 1.3 |
| CaO | Óxido de calcio | 7.8 ± 0.6 |
| Al ₂ O ₃ | Óxido de aluminio | 15.9 ± 1.3 |
| Na ₂ O | Óxido de sodio | 3.2 ± 0.5 |
| Mg, K ₂ O y Ti ₂ O | Magnesio, óxido de potasio, óxido de titanio | 3 |

Fuente: (Guevara, 2015)

Los porcentajes de minerales señalados en la Tabla 2.4 no han tenido cambios significativos desde el año 1999 (Guevara, 2015).⁸

2.3 CENIZA DE LA CASCARILLA DE ARROZ (CCA)

La cascarilla de arroz es un material de desecho agrícola constituido por celulosa y sílice, componentes que enriquecen a la cascarilla para diferentes usos como: abono de cultivos, aislante térmico, combustible alternativo, y construcción (Amen, Lung, & Allauca, 2009).

La cascarilla de arroz representa la quinta parte de la producción mundial de arroz. De manera aproximada, se puede obtener 40kg de ceniza a partir de 200kg de cascarilla. Para la obtención de una ceniza altamente puzolánica con contenidos de sílice entre 90% al 95%, la cascarilla debe ser quemada a una temperatura controlada de 500°C a 700°C con el fin de no cristalizar la sílice en forma desordenada (Molina, 2002).

2.3.1 PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LA CCA

Las propiedades más relevantes de la ceniza de cascarilla de arroz se muestran en la Tabla 2.5.

TABLA 2. 5. PROPIEDADES DE LA CCA.

| CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ | |
|--------------------------------------|-------------------------|
| Propiedades | Valores |
| Densidad | 2265 kg/m ³ |
| Superficie específica | 2000 m ² /kg |
| Masa unitaria compactada | 452 kg/m ³ |
| Masa unitaria suelta | 181 kg/m ³ |

Fuente:(Molina, 2002)

2.3.2 ESTRUCTURA MINERAL CCA

La ceniza de cascarilla de arroz se encuentra formada por los minerales expuestos en la Tabla 2.6.

TABLA 2. 6. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE LA CCA.

| CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ | | |
|--------------------------------------|-------------------|-------------|
| Mineral | | % |
| SiO ₂ | Óxido de silicio | 94.1 |
| K ₂ O | Óxido de potasio | 2.1 |
| MgO | Óxido de magnesio | 0.95 |
| CaO | Oxido de calcio | 0.55 |
| P ₂ O ₅ | Óxido fosfórico | 0.41 |
| Fe ₂ O ₃ | Óxido férrico | 0.3 |
| Al ₂ O ₃ | Oxido de aluminio | 0.12 |
| Na ₂ O | Óxido de sodio | 0.11 |
| SO ₃ | Óxido sulfúrico | 0.06 |
| TiO ₂ | Óxido de titanio | 0.05 |
| CL | Cloruro | 0.05 |
| Pérdida | | 1.1 |
| Total | | 99.9 |

Fuente: (Amen, Lung, & Allauca, 2009)

2.4 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS EXPANSIVOS

Las propiedades de mayor importancia que deben ser mejoradas con la estabilización son: (Valle, 2010)

- Estabilidad volumétrica
Las variaciones volumétricas se pueden evidenciar con la presencia o ausencia de agua, este cambio se puede presentar de manera rápida, por lo que es necesario conocer la expansión del suelo.
- Resistencia
- Permeabilidad
- Compresibilidad
- Durabilidad

2.4.1 GENERALIDADES

La estabilización es una técnica que consiste en combinar materiales con el suelo para mejorar sus propiedades, con el fin de obtener un suelo estable que soporte cargas y climas severos; de esta forma se asegura que el suelo sea apto para procesos constructivos (Valle, 2010).

2.4.2 MÉTODOS TRADICIONALES DE ESTABILIZACIÓN

Las estabilizaciones son procedimientos que pueden ser mecánicos, físicos y/o químicos, cuyo objetivo es mejorar el comportamiento de los suelos tales como resistencia y deformación. En ocasiones para reducir los cambios volumétricos en un suelo se añade aditivos como: cal, cemento o puzolanas. Debido a la gran variedad de los suelos hace que cada método de estabilización sea aplicable a cierto tipo de suelos, en ocasiones esta heterogeneidad de los suelos se presenta a metros, en otros casos a kilómetros de profundidad (López, Hernández, Horta, Coronado, & Castaño, 2010).

2.4.2.1 ESTABILIZACIÓN MECÁNICA

Esta estabilización consiste en mejorar de manera considerable un suelo sin generar reacciones químicas.

- **COMPACTACIÓN CON MAQUINARIA**

Es el método de estabilización mecánica más usado, consiste en eliminar los vacíos del suelo, aumentando de esta manera su densidad, estabilidad y capacidad de soporte, entre otras propiedades.

Entre algunas ventajas se tiene: mejoramiento de la compresibilidad, aumento de la capacidad de carga, disminución de los espacios vacíos, incremento de la resistencia, mejoramiento en el comportamiento esfuerzo-deformación y la estabilidad en taludes y terraplenes. El uso de este método de estabilización se lo puede observar en: terraplenes, presas de tierra, diques, pavimentos y mejoramientos del suelo para la cimentación (Hernández, Mejía , & Zelaya, 2016).

El empleo de maquinaria para la estabilización de un suelo después de su explanación es esencial, entre ellas se puede anotar:

- Apisonador (Sapito bailarín)
- Rodillo “pata de cabra”
- Placa compactadora
- Rodillo vibratorio

2.4.2.2 ESTABILIZACIÓN FÍSICA

La estabilización física consiste en producir únicamente cambios físicos en el suelo, entre los métodos más usados se encuentran (Valle, 2010):

- **MEZCLA DE SUELOS**

Es una de las estabilizaciones más usadas, sin embargo, para obtener resultados satisfactorios es necesario utilizar la compactación como complemento. Se debe combinar las propiedades de suelos gruesos y finos; los suelos gruesos, como gravas y arenas, proporcionan un gran rozamiento interno que soporta grandes esfuerzos, pero esto hace que no sean suelos firmes como base ya que no existe cohesión entre sus partículas. Los suelos finos como las arcillas tienen una alta cohesión, pero carecen de estabilidad cuando su contenido de humedad es alto.

La mezcla adecuada de suelos gruesos y finos dará como resultado un material estable, que combina las propiedades físicas de ambos para mantener sus partículas unidas entre sí (Valle, 2010).

- **POR CALENTAMIENTO**

Se aplica de forma directa al suelo una llamarada que genera la acumulación de gases calientes en la superficie evaporando el agua en la capa expuesta, de esta manera la arcilla llegará a un proceso de rehidratación irreversible, disminuyendo su potencial expansivo (Nieto & Parra, 1985).

- **POR ENFRIAMIENTO**

El agua contenida entre los espacios de las partículas de arcilla es llevada a un punto de congelación (temperaturas inferiores a 0°C), aumentando así su resistencia; esto se logra mediante refrigerantes que circulan por tuberías ubicadas en el interior de la arcilla por estabilizarse. Este método es empleado en la construcción de cimentaciones profundas (Nieto & Parra, 1985).

2.4.2.3 ESTABILIZACIÓN QUÍMICA

Este tipo de estabilización utiliza sustancias químicas que generan cambios en la constitución química de los suelos. Entre las sustancias más utilizadas se encuentran: cemento, polímeros, puzolanas, cal entre otras (Valle, 2010).

- **CAL**

La cal es un material que proviene de la calcinación de minerales calizos y dolomíticos, está compuesta por hidróxidos de calcio, magnesio y óxidos de silicio, aluminio y hierro (Bauzá, 2015).

Los porcentajes de reemplazo con cal varían entre 5 al 10 %. Cuando se añade cal a un suelo arcilloso pueden ocurrir dos tipos de reacciones: (Das, 2015).

- **POLÍMEROS**

Los polímeros son materiales conformados por moléculas que se encuentran constituidas por unidades repetitivas y ordenadas. Actualmente, los polímeros son utilizados en diferentes fines como: fabricación de botellas, temple de acero, aluminio y material aeroespacial, elaboración de productos geosintéticos, entre otros. Para la estabilización de suelos con polímeros se utiliza porcentajes de máximo 5% ya que en porcentajes superiores no se aprecia un cambio significativo en las propiedades del suelo (López, Hernández, Horta, Coronado, & Castaño, 2010).

- **CEMENTO**

El cemento es un material aglomerante que se forma a partir de la piedra caliza y arcillas calcinadas. Para la estabilización de suelos con cemento se utiliza porcentajes de reemplazo entre un 8% a 14%, dependiendo del grado de plasticidad que tenga. Las arcillas de calcio se estabilizan con facilidad con cemento y las arcillas expansivas compuestas por sodio e hidrógeno se estabilizan con cal (Das, 2015).

2.4.3 CRITERIO DE DOSIFICACIÓN DE ARCILLA EXPANSIVA CON PUZOLANA DE LA CV Y CCA

El criterio de dosificación de las puzolanas se planteó de acuerdo con una revisión bibliográfica previa. En donde, se establecieron porcentajes comunes de reemplazo de 10%, 20% y 30 % en peso del material a estabilizar.

Con la finalidad de correlacionar los resultados del trabajo que se realizará, con los obtenidos en los siguientes trabajos técnicos-experimentales:

“Estabilización de la estabilización de arcillas expansivas de Manabí con la ceniza del volcán Tungurahua” (Buitrón & Enríquez, 2018).

“Estabilización de arcillas expansivas de la provincia de Manabí con puzolana extraída de ceniza de cascarilla de arroz” (Chicaiza & Oña, 2018).

Se utilizará los mismos porcentajes de reemplazo con una composición de igual porcentaje para los dos tipos de puzolanas, es decir, 50:50.

CAPÍTULO 3

MUESTREO Y PREPARACIÓN DE MUESTRAS Y ENSAYOS

3.1 MUESTREO DEL SUELO EXPANSIVO

Como se mencionó anteriormente, se realizó la toma de siete muestras de suelo, de las cuales, tres muestras de arcilla (M3, M4 y M5) presentan características de alta presión de expansión, y son con las que se realiza el estudio. Su ubicación se detalla en la Tabla 3.1 y Figura 3.1.

FIGURA 3. 1. UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS A ESTABILIZAR.



Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

TABLA 3. 1. UBICACIÓN EN COORDENADAS UTM DE LAS MUESTRAS A ESTABILIZAR

| Muestra | Zona | LONGITUD | LATITUD |
|----------------|-------------|-----------------|----------------|
| M3 | 17 M | 557841.43 | 9897556.42 |
| M4 | 17 M | 563167.51 | 9898622.20 |
| M5 | 17 M | 583398.70 | 9912025.19 |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

La toma de las muestras se realizó según lo especificado en la norma NTE INEN 687 MECÁNICA DE SUELOS, TOMA DE MUESTRAS INALTERADAS, con ayuda del personal del LEMSUR.

Las muestras fueron conservadas en cajas de madera, envueltas en plástico sobre una cama de aserrín, con la finalidad de aislarlas de la humedad y corrientes de viento.

3.2 MUESTREO DE LA CV

La ceniza volcánica utilizada en este estudio fue extraída del volcán Tungurahua, específicamente en la quebrada Achupashal, sector Guadalupe, situada cerca del Observatorio Vulcanológico de Tungurahua (OVT) (IG EPN, 2014)

En la Figura 3.2 se muestra los lugares de extracción de la ceniza volcánica.

La toma de muestra de ceniza volcánica se realizó por personal del Instituto Geofísico (IG) y por personal del LEMSUR.

Las muestras de ceniza fueron tomadas en estado consolidado, transportadas hacia las instalaciones del LEMSUR para su posterior proceso de obtención de puzolana.

FIGURA 3. 2. LUGARES DE EXTRACCIÓN DE CENIZA VOLCÁNICA.



Fuente: (IG EPN, 2014)

3.3 PREPARACIÓN DE LA PUZOLANA DE CCA

La cascarilla de arroz, obtenida en la provincia de Esmeraldas, fue dispuesta en bandejas, para posteriormente ubicarla en una mufla y llevar este material hasta 700°C por un tiempo de dos horas; temperatura y tiempo necesario para obtener la mejor calidad de puzolana. (Cheng, y otros, 2018). Luego, la ceniza obtenida es molida con ayuda de un molino de granos manual y tamizada sobre el tamiz N° 200 (0.075 mm).

FIGURA 3. 3. CASCARRILLA DE ARROZ Y PUZOLANA DE CCA.



Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

Según (Cheng, y otros, 2018) hay existencia de puzolana en toda la fracción de cenizas, sin embargo, la puzolana de mejor calidad puzolánica o de alto contenido

de sílice, se encuentra en las fracciones más pequeñas del material. Por ello, se usó la fracción que pasa el tamiz N°200, ver Figura 3.3.

3.4 PREPARACIÓN DE LA PUZOLANA DE CV

Para la preparación de la puzolana de ceniza volcánica, fue necesario triturar rocas de ceniza. Con ayuda de la máquina de los ángeles, se logró pulverizar en un gran porcentaje la muestra de ceniza aplicando 500 revoluciones y 12 esferas, la misma que fue tamizada sobre el tamiza N°200 (0.075 mm).

La muestra que pasa el tamiz No. 200 es catalogada como puzolana de alto contenido de sílice. Es por esta razón que para el estudio se usará el material de ceniza volcánica que pasa el tamiz N°200, ver Figura 3.4.

FIGURA 3. 4. CENIZA VOLCÁNICA Y PUZOLANA DE CV



Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

3.5 DOSIFICACIONES DE LAS MEZCLAS

La dosificación seleccionada para la mezcla estabilizada de este estudio es de 50% de puzolana de ceniza volcánica y 50% de puzolana de cascarilla de arroz, para porcentajes del 10, 20 y 30 % de reemplazo de arcilla por puzolana, ver Tabla 3.2.

TABLA 3. 2. DOSIFICACIONES DE COMPOSICIÓN EN PESO DE PUZOLANA DE CCA Y CV.

| Dosificación de mezclas de puzolana | | | |
|--|--------------------|---------------------------------------|--|
| Muestra | % Reemplazo | Composición en peso | |
| | | % Puzolana de ceniza volcánica | % Puzolana de ceniza de cascarilla de arroz |
| M3 | 10 | 50 | 50 |
| | 20 | 50 | 50 |
| | 30 | 50 | 50 |
| M4 | 10 | 50 | 50 |
| | 20 | 50 | 50 |
| | 30 | 50 | 50 |
| M5 | 30 | 50 | 50 |
| | 30 | 50 | 50 |
| | 30 | 50 | 50 |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

3.6 ENSAYOS EN MUESTRAS NATURALES DE ARCILLAS

A continuación, se detalla los ensayos realizados a las muestras de arcillas expansivas de la provincia de Manabí. El objetivo de estos ensayos es determinar características físicas y mecánicas para analizar el comportamiento y desempeño de cada uno de estos suelos. Las muestras que se ensayarán corresponden a las identificaciones M3, M4 y M5 clasificadas como arcillas de alta plasticidad y expansividad.

Los ensayos que se realizaron se rigen a documentos actualizados normados por la American Society for Testing and Materials (ASTM).

Cada ensayo detallado en esta sección constará de un breve resumen sobre la fundamentación teórica y la presentación de los resultados provenientes de la experimentación.

3.6.1 ENSAYOS FÍSICOS

3.6.1.1 CONTENIDO DE HUMEDAD

El contenido de humedad de un suelo w , es la relación entre la masa de agua contenida en el suelo y la masa del suelo seco, es decir, el peso constante que se obtiene luego de someter a una muestra de suelo a una temperatura comprendida entre $110^{\circ} \text{C} \pm 5^{\circ} \text{C}$ por un periodo de 16h (ASTM D2216, 2010).

ECUACIÓN 3. 1. CONTENIDO DE HUMEDAD.

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

Donde

w : Contenido de humedad, %

W_w : Masa de agua, g

W_s : Masa de suelo seco, g

Los ensayos de contenido de humedad, que se ejecutaron con las muestras de arcillas M3, M4 y M5, se realizaron acorde con ASTM D2216 "Test Method for Laboratory Determination of Water Content of Soil and Rock"

Los informes de laboratorio de estos ensayos son detallados en el Anexo 1. INF. No.19-0046-I. El resumen de los resultados es detallado a continuación.

TABLA 3. 3. CONTENIDO DE HUMEDAD DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5 NATURALES.

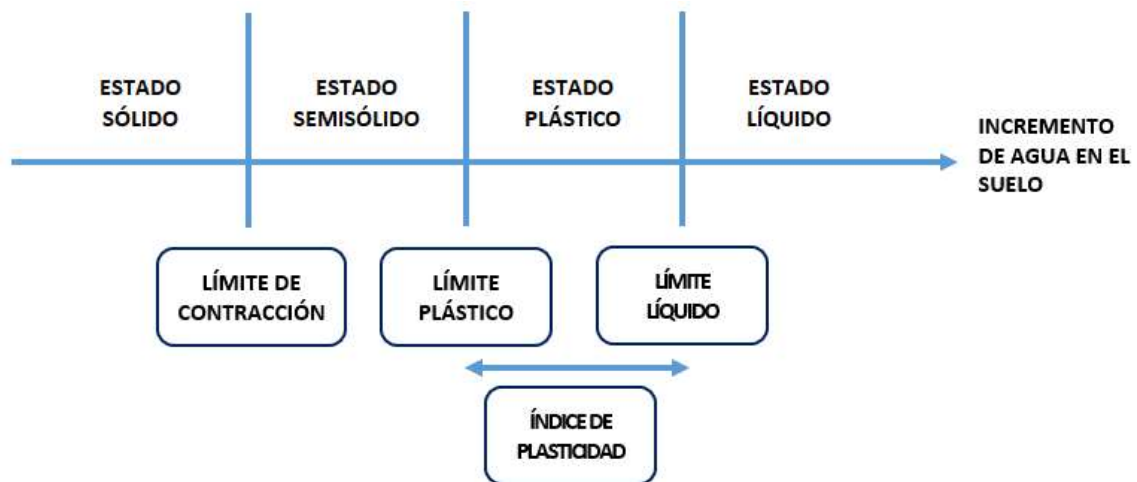
| CONTENIDO DE HUMEDAD | | | | | |
|----------------------|------------|-----------------|---------------|------------------|-------------|
| ASTM D 2216 | | | | | |
| Muestra | Prueba No. | Peso húmedo (g) | Peso Seco (g) | Peso cápsula (g) | Humedad (%) |
| M3 | 1 | 67.62 | 57.86 | 9.44 | 20.14 |
| | 2 | 60.16 | 51.52 | 9.74 | 20.70 |
| M4 | 1 | 62.01 | 53.33 | 9.34 | 19.74 |
| | 2 | 59.99 | 51.61 | 9.37 | 19.85 |
| M5 | 1 | 59.91 | 53.46 | 9.62 | 14.72 |
| | 2 | 46.89 | 42.16 | 9.47 | 14.45 |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

3.6.1.2 LÍMITES DE ATTERBERG

Los límites de Atterberg con tres y dividen a cuatro estados del suelo (ver Figura 3.5)

FIGURA 3. 5. LIMITES DE ATTERBERG Y ESTADOS DEL SUELO.



Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

Límite Líquido

El ensayo para la determinar del límite líquido de un suelo se encuentra regulado por la ASTM D4318.

El límite líquido es el contenido de humedad con el que un suelo cambia de estado plástico al estado líquido. La resistencia al esfuerzo cortante de los suelos en el límite líquido es muy pequeña, siendo alrededor de 25 g/cm^2 y su cohesión es nula (Crespo, 2004).

En laboratorio, el límite líquido es el contenido de humedad requerido para que la muestra de suelo colocada en la copa de Casagrande (ver Figura 3.6) cierre una ranura de 13mm a lo largo de la parte inferior de la ranura, después de haber realizado 25 golpes a la copa de Casagrande, con un ritmo de dos golpes por segundo (Handy & Spangler, 2007).

FIGURA 3. 6. ENSAYO DE LÍMITE LÍQUIDO.

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

Los informes de laboratorio de estos ensayos son detallados en el Anexo 1. INF. No.19-0046-I. El resumen de los resultados de estos ensayos se detalla en la Tabla 3.4.

TABLA 3. 4. LÍMITE LÍQUIDO DE MUESTRAS NATURALES.

| LÍMITE LÍQUIDO | | | | | | |
|-----------------------|-------------------|------------------------|----------------------|-------------------------|--------------------|--------------------------------|
| ASTM D 4318 | | | | | | |
| Muestra | No. Golpes | Peso húmedo (g) | Peso Seco (g) | Peso cápsula (g) | Humedad (%) | Humedad a 25 golpes (%) |
| M3 | 32 | 18.32 | 13.14 | 5.27 | 65.82 | |
| | 27 | 17.96 | 12.16 | 5.07 | 81.81 | 89 |
| | 23 | 17.66 | 11.60 | 5.32 | 96.50 | |
| M4 | 34 | 17.23 | 14.40 | 10.61 | 74.67 | |
| | 23 | 15.01 | 12.82 | 10.23 | 84.35 | 83 |
| | 20 | 16.59 | 13.70 | 10.52 | 90.76 | |
| M5 | 30 | 15.09 | 11.24 | 5.07 | 62.40 | |
| | 26 | 16.78 | 12.14 | 5.13 | 66.19 | 67 |
| | 19 | 19.26 | 13.38 | 5.22 | 72.06 | |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

Límite Plástico

En suelos cohesivos, el límite plástico es el contenido humedad en el que un suelo cambia de estado semisólido a plástico.

Para la determinación del límite plástico (Figura 3.7), se toman unos 8 g de este suelo, se forma con él una esfera, y se rueda entre la palma de la mano y una superficie lisa no absorbente, hasta que el suelo se enrolle en hilos de 3.2 mm de diámetro, si al llegar a los 3.2 mm se presentan pequeños agrietamientos aproximadamente cada centímetro de separación, el suelo se encuentra en su límite plástico, caso contrario se repite el procedimiento.

FIGURA 3. 7. ENSAYO DE LÍMITE PLÁSTICO



Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

Los informes de laboratorio de estos ensayos son detallados en el Anexo 1. INF. No.19-0046-I. El resumen de los resultados de estos ensayos se presenta en la Tabla 3.5.

TABLA 3. 5. LÍMITE PLÁSTICO DE MUESTRAS NATURALES

| LÍMITE PLÁSTICO | | | | | | |
|-----------------|------------|-----------------|---------------|------------------|-------------|------------------|
| ASTM D 4318 | | | | | | |
| Muestra | Prueba No. | Peso húmedo (g) | Peso Seco (g) | Peso cápsula (g) | Humedad (%) | Humedad prom (%) |
| M3 | 1 | 9.60 | 8.39 | 5.13 | 37.1 | 37 |
| | 2 | 9.96 | 8.72 | 5.40 | 37.3 | |
| M4 | 1 | 12.67 | 11.02 | 5.47 | 29.7 | 30 |
| | 2 | 13.50 | 11.59 | 5.32 | 30.5 | |
| M5 | 1 | 12.35 | 11.00 | 5.47 | 24.4 | 24 |
| | 2 | 13.17 | 11.59 | 5.13 | 24.5 | |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

Índice de plasticidad

Es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, indica un rango de humedades en el cual el suelo es plástico; el índice plástico depende de la cantidad de arcilla presente en el suelo (Crespo, 2004).

El resumen de los resultados de estos ensayos es presentado a continuación.

TABLA 3. 6. ÍNDICE PLÁSTICO DE MUESTRAS NATURALES

| ÍNDICE PLÁSTICO ASTM D 4318-10 | |
|-----------------------------------|--------|
| MUESTRA | IP (%) |
| M3 | 52 |
| M4 | 53 |
| M5 | 42 |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

3.6.1.3 GRANULOMETRÍA

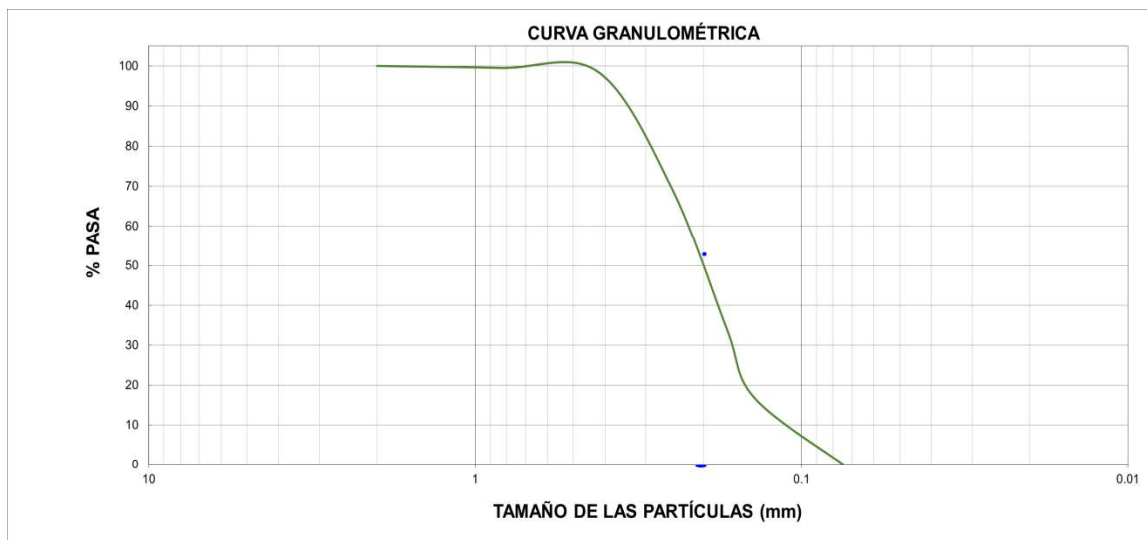
“El análisis granulométrico se refiere a la determinación de la cantidad en por ciento de los diversos tamaños de las partículas que constituyen el suelo. Para clasificar por tamaños las partículas gruesas el procedimiento más expedito es el del tamizado” (Landi & Pesántez, 2015).

3.6.1.3.1 GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO

Para clasificar por tamaños las partículas gruesas se realiza un tamizado.

El tamizado consiste en pasar el suelo por unas mallas de distintos tamaños de abertura, con los resultados de pesos retenidos, se determinan los porcentajes de material que pasan por una serie de mallas (Handy & Spangler, 2007).

Para el análisis, se traza la curva de la composición granulométrica del material en una gráfica que tiene por abscisas, a escala logarítmica, las aberturas de las mallas y por ordenadas los porcentajes de material que pasa por dichas mallas, a escala aritmética. (Crespo, 2004, pág. 47)

FIGURA 3. 8. CURVA GRANULOMÉTRICA

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

Los ensayos de determinación de distribución granulométrica, que se ejecutaron con las muestras de arcillas M3, M4 y M5, se realizaron acorde con ASTM D6913 “Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis”

Los informes de laboratorio de estos ensayos son detallados en el Anexo 1. INF. No.19-0046-I. El resumen de los resultados de estos ensayos se detalla en la Tabla 3.7.

TABLA 3. 7. GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5.

| GRANULOMETRÍA | | | | | | | |
|---------------|---------------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|
| ASTM D6913 | | | | | | | |
| Tamiz No. | Abertura Tamiz (mm) | Muestra M3 | | Muestra M4 | | Muestra M5 | |
| | | Peso Retenido (g) | Pasante (%) | Peso Retenido (g) | Pasante (%) | Peso Retenido (g) | Pasante (%) |
| No. 3/8 | 9.500 | - | - | - | - | - | 100 |
| No. 4 | 4.750 | 0.00 | 100.00 | 0.00 | 100.00 | 0.44 | 99.70 |
| No. 10 | 2.000 | 0.03 | 100.00 | 0.10 | 99.90 | 0.48 | 99.30 |
| No. 20 | 0.850 | 0.09 | 99.90 | 0.20 | 99.80 | 0.88 | 98.60 |
| No. 40 | 0.425 | 2.54 | 97.90 | 0.27 | 99.50 | 2.04 | 97.10 |
| No. 200 | 0.075 | 9.71 | 90.10 | 14.12 | 88.30 | 10.33 | 89.20 |
| Pasa 200 | - | 112.19 | - | 110.52 | - | 116.74 | 0.00 |
| Total | | 124.57 | | 125.21 | | 130.91 | |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

3.6.1.3.2 GRANULOMETRÍA POR HIDRÓMETRO

Este ensayo está basado en la sedimentación del suelo en agua (ASTM D7928, 2017). Cuando una el suelo se sedimenta en agua, las partículas descienden a diferentes velocidades, dependiendo de sus formas, tamaños y pesos. El análisis de sedimentación se basa en el concepto de que las partículas más grandes caerán, a través de un fluido, más rápido que las partículas más pequeñas. Este método se basa en la Ley de Stokes, la cual proporciona una ecuación de control utilizada para determinar la velocidad de una partícula esférica que cae a través de un líquido estacionario. Esta velocidad es proporcional al cuadrado del diámetro de la partícula. Por lo tanto, las partículas se clasifican por su diámetro en función del tiempo y posición cuando se sedimentan en un contenedor de líquido (Valencia & Huertas, 2018).

Según la norma ASTM D7928 (2017) para la realización de este ensayo se debe tomar la fracción de suelo que pase el tamiz N°10 (2 mm), se prepara la solución con defloculante (hexametáfosfato) y agua, en una composición de 5% de hexametáfos en relación al peso de agua, (6.25 g de Hexametáfosfato, 250 g de agua), la cual debe reposar con la muestra de suelo por un tiempo mínimo de 16 horas. Las lecturas de densidad y temperatura se toman con un hidrómetro y un termómetro en intervalos de tiempo específicos. Los datos se registran y se determina el porcentaje que pasa y los diámetros de las partículas según lo especificado en la norma.

Los ensayos de determinación de distribución granulométrica por hidrómetro, que se ejecutaron con las muestras de arcillas M3, M4 y M5, se realizaron acorde con ASTM D7928 "Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis"

Los informes de laboratorio de estos ensayos son detallados en los Anexos 2, 3 y 4. INF. No.19-0051-I, INF. No.19-0052-I e INF. No.19-0053-I respectivamente. El resumen de los resultados de estos ensayos se detalla en la Tabla 3.8.

TABLA 3. 8. GRANULOMETRÍA POR HIDRÓMETRO DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5.

| GRANULOMETRÍA POR HIDRÓMETRO | | | | | | |
|------------------------------|-------------|---------------------|-------------|---------------------|-------------|---------------------|
| ASTM D7928 | | | | | | |
| Tiempo (min) | Muestra M3 | | Muestra M4 | | Muestra M5 | |
| | Diámetro Dm | Peso Pasante Nm (%) | Diámetro Dm | Peso Pasante Nm (%) | Diámetro Dm | Peso Pasante Nm (%) |
| 1 | 0.0320 | 79.30% | 0.0314 | 84.60% | 0.0286 | 84.30% |
| 2 | 0.0232 | 76.90% | 0.0231 | 80.40% | 0.0214 | 79.70% |
| 4 | 0.0167 | 74.70% | 0.0168 | 77.00% | 0.0159 | 75.00% |
| 15 | 0.0090 | 69.70% | 0.0092 | 69.70% | 0.0087 | 68.10% |
| 30 | 0.0066 | 64.70% | 0.0066 | 66.30% | 0.0064 | 63.40% |
| 60 | 0.0048 | 58.90% | 0.0049 | 61.20% | 0.0047 | 58.80% |
| 120 | 0.0035 | 54.80% | 0.0035 | 57.80% | 0.0034 | 55.70% |
| 240 | 0.0026 | 49.80% | 0.0025 | 54.40% | 0.0025 | 51.80% |
| 1440 | 0.0011 | 38.20% | 0.0011 | 45.10% | 0.0011 | 44.10% |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

3.6.1.4 ACTIVIDAD

El agua adsorbida por las partículas de arcilla da como resultado la propiedad plástica de los suelos, el límite líquido y límite plástico se ven afectados por los minerales presentes en la arcilla. En 1953 Skempton observó una relación lineal creciente entre índice de plasticidad y la porción de arcilla con un tamaño inferior a 2μ , siendo la actividad, la pendiente que relaciona IP y la fracción (%) más fina de 2μ (Das, 2015).

ECUACIÓN 3. 2. ACTIVIDAD DE LAS ARCILLAS

$$A = \frac{IP}{\% \text{ de arcilla, por peso}}$$

Donde:

A: Actividad de la arcilla

IP: índice de plasticidad

La actividad de las arcillas se puede clasificar de la siguiente manera:

TABLA 3. 9. ACTIVIDAD DE LAS ARCILLAS.

| A | TIPO DE ARCILLA |
|-----------|---|
| <0.5 | Arcillas con poca actividad (caolinítico) |
| 0.5 - 0.7 | Arcilla con actividad normal (illítico) |
| >1 | Arcillas más activas (montmorillonítico) |

Fuente: (Das, 2015)

De los datos obtenidos de los ensayos de límites de Atterberg y granulometría se determinó la actividad de las muestras de arcilla en estado natural y se obtuvo los resultados expuestos en la Tabla 3.10.

TABLA 3. 10. ACTIVIDAD DE MUESTRAS NATURALES.

| MUESTRA | IP (%) | % < 2μ | ACTIVIDAD | CLASIFICACIÓN |
|----------------|---------------|---------------------------------|------------------|----------------------|
| M3 | 52 | 44 | 1.18 | MONTMORILLONÍTICA |
| M4 | 53 | 49.75 | 1.07 | MONTMORILLONÍTICA |
| M5 | 42 | 47.52 | 0.88 | MONTMORILLONÍTICA |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

3.6.1.5 CLASIFICACIÓN SUCS

La Figura 3.9 ilustra el sistema de clasificación que tiene tres divisiones: suelos gruesos (grava y arena), suelos finos y suelos orgánicos. Estos tres grandes grupos se subdividen en otros 15 subgrupos.

Para el cálculo de Coeficiente de uniformidad (C_u) y coeficiente de gradación (C_c) se utilizan las Ecuaciones 3.3 y 3.4.

ECUACIÓN 3. 3. COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

ECUACIÓN 3. 4. COEFICIENTE DE GRADACIÓN.

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} * D_{10}}$$

Donde

D60: tamaño por el que pasa el 60% del material.

D30: tamaño por el que pasa el 30% del material.

D10: tamaño por el que pasa el 10% del material

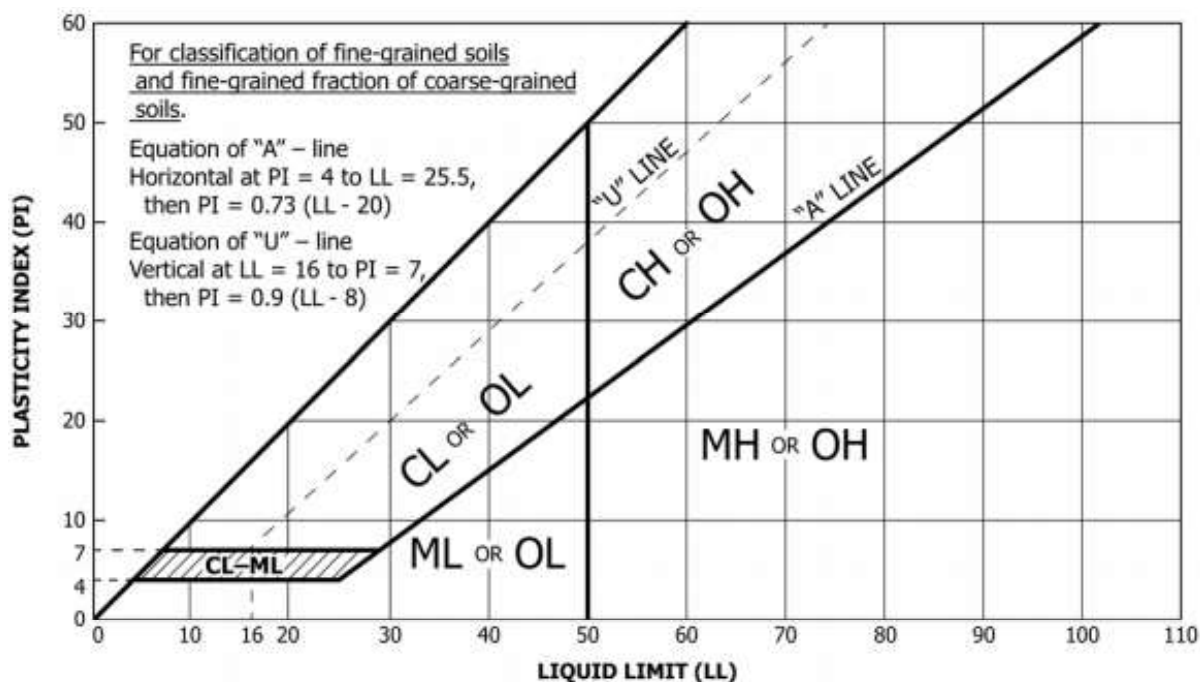
Con la información adquirida y con la ayuda de la Carta de Plasticidad (Figura 3.10) se puede determinar el tipo de suelo.

FIGURA 3. 9. CARTA DE CLASIFICACIÓN SUCS

| Criteria for Assigning Group Symbols and Group Names Using Laboratory Tests ^A | | | | Soil Classification | | |
|--|--|---|---|---|-----------------------------------|--|
| | | | | Group Symbol | Group Name ^B | |
| COARSE-GRAINED SOILS | Gravels (More than 50 % of coarse fraction retained on No. 4 sieve) | Clean Gravels (Less than 5 % fines ^C) | $Cu \geq 4.0$ and $1 \leq Cc \leq 3.0^D$ | GW | Well-graded gravel ^E | |
| | | | $Cu < 4.0$ and/or $[Cc < 1 \text{ or } Cc > 3.0]^D$ | GP | Poorly graded gravel ^E | |
| | | Gravels with Fines (More than 12 % fines ^C) | Fines classify as ML or MH | GM | Silty gravel ^{E,F,G} | |
| | | | Fines classify as CL or CH | GC | Clayey gravel ^{E,F,G} | |
| | | | | | | |
| More than 50 % retained on No. 200 sieve | Sands (50 % or more of coarse fraction passes No. 4 sieve) | Clean Sands (Less than 5 % fines ^H) | $Cu \geq 6.0$ and $1.0 \leq Cc \leq 3.0^D$ | SW | Well-graded sand ^I | |
| | | | $Cu < 6.0$ and/or $[Cc < 1.0 \text{ or } Cc > 3.0]^D$ | SP | Poorly graded sand ^I | |
| | | Sands with Fines (More than 12 % fines ^H) | Fines classify as ML or MH | SM | Silty sand ^{F,G,I} | |
| | | | Fines classify as CL or CH | SC | Clayey sand ^{F,G,I} | |
| FINE-GRAINED SOILS | Silts and Clays | inorganic | $PI > 7$ and plots on or above "A" line ^J | CL | Lean clay ^{K,L,M} | |
| | | | $PI < 4$ or plots below "A" line ^J | ML | Silt ^{K,L,M} | |
| | 50 % or more passes the No. 200 sieve | Silts and Clays | inorganic | PI plots on or above "A" line | CH | Fat clay ^{K,L,M} |
| | | | | PI plots below "A" line | MH | Elastic silt ^{K,L,M} |
| | | Liquid limit less than 50 | organic | $\frac{\text{Liquid limit - oven dried}}{\text{Liquid limit - not dried}} < 0.75$ | OL | Organic clay ^{K,L,M,N} Organic silt ^{K,L,M,O} |
| | | | | | | |
| Liquid limit 50 or more | organic | $\frac{\text{Liquid limit - oven dried}}{\text{Liquid limit - not dried}} < 0.75$ | OH | Organic clay ^{K,L,M,P} Organic silt ^{K,L,M,Q} | | |
| | | | | | | |
| HIGHLY ORGANIC SOILS | Primarily organic matter, dark in color, and organic odor | | | PT | Peat | |

Fuente (ASTM D2487, 2017)

FIGURA 3. 10. CARTA DE PLASTICIDAD



Fuente (ASTM D2487, 2017)

Los ensayos para la determinación de la clasificación de suelos, se realizaron acorde con ASTM D2487 "Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)"

Los informes de laboratorio de estos ensayos son detallados en el Anexo 1. INF. No.19-0046-I. El resumen de los resultados de clasificación de suelos de las muestras es presentado a continuación.

TABLA 3. 11. CLASIFICACIÓN SUCS DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5.

| CLASIFICACIÓN SUCS | | | |
|--------------------|--------|--------|-------|
| ASTM D 4318 | | | |
| MUESTRA | LL (%) | LP (%) | SUCS |
| M3 | 89 | 37 | MH-CH |
| M4 | 83 | 30 | CH |
| M5 | 67 | 24 | CH |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

3.6.1.6 GRAVEDAD ESPECÍFICA

La gravedad específica es conocida también como densidad de sólidos o densidad relativa, se define como la relación entre la densidad de una sustancia con la densidad del agua a 20 °C. La Tabla 3.12 muestra la densidad de sólidos (Gs) de algunos minerales presentes en los suelos.

“Para suelos arcillosos y limosos, puede variar desde 2.6 hasta 2.9” (Das, 2015).

TABLA 3. 12. GRAVEDAD ESPECÍFICA DE MINERALES MÁS IMPORTANTES.

| Gravedad específica de los minerales más importantes | |
|---|-----------|
| Mineral | % |
| Cuarzo | 2.65 |
| Caolinita | 2.60 |
| Illita | 2.80 |
| Montmorillonita | 2.65-2.80 |
| Haloisita | 2.0-2.55 |
| Feldespatos de potasio | 2.57 |
| Feldespatos de sodio y calcio | 2.62-2.76 |
| Clorita | 2.60-2.90 |
| Biotita | 2.80-3.20 |
| Muscovita | 2.76-3.10 |
| Hornblenda | 3.0-3.47 |
| Limonita | 3.60-4.0 |
| Olivino | 3.27-3.37 |

Fuente: (Das, 2015)

Los ensayos de determinación de densidad de sólidos, que se ejecutaron con las muestras de arcilla M3, M4 y M5, se realizaron acorde con ASTM D854 “Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer”

FIGURA 3. 11. ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA.

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

Los informes de laboratorio de estos ensayos son detallados en el Anexo 5. INF. No.19-0054-I. El resumen de los resultados de estos ensayos se detalla en la Tabla 3.13.

TABLA 3. 13. GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5

| GRAVEDAD ESPECÍFICA | |
|---------------------|----------------|
| ASTM D 854 | |
| MUESTRA | G _s |
| M3 | 2.784 |
| M4 | 2.747 |
| M5 | 2.784 |

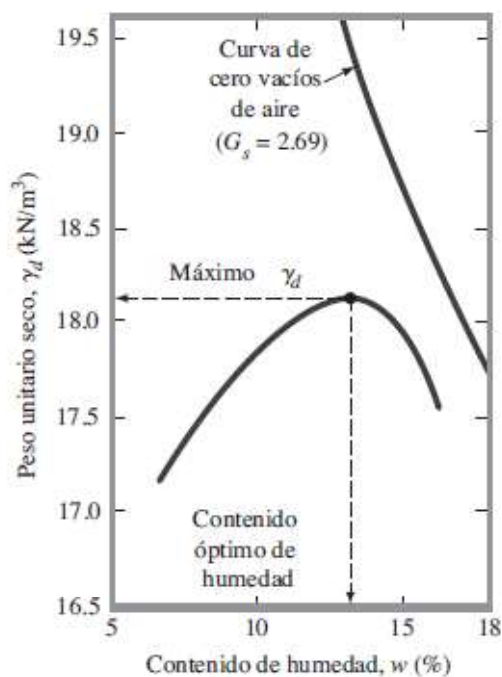
Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

3.6.1.7 COMPACTACIÓN PRÓCTOR

La compactación de suelos es considerada un proceso de mejoramiento de suelos, un medio para aumentar la resistencia y disminuir la compresibilidad de estos (Crespo, 2004).

Proctor descubrió que para compactar un suelo y usando una energía determinada, la densidad obtenida varía en función de la humedad según una curva (ver Figura 3.12) en la que se observa la existencia de un porcentaje óptimo de humedad con la que se alcanza la densidad máxima seca para ese suelo, con esa energía de compactación (Crespo, 2004).

FIGURA 3. 12. CURVA DE COMPACTACIÓN DE SUELOS.



Fuente: (Das, 2015)

En el punto máximo de la curva a la abscisa se le denomina humedad óptima y a la ordenada densidad máxima seca ($\gamma_{d \text{ máx}}$) respectivamente.

Existen dos tipos de compactación Proctor, las diferencias de los mismos se expresan en la siguiente Tabla 3.14, y corresponden a la energía de compactación aplicada.

TABLA 3.14. CARACTERÍSTICAS DE LOS TIPOS DE COMPACTACIÓN PROCTOR

| COMPACTACIÓN PROCTOR | | |
|-------------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| | ASTM D698 Estándar | ASTM D1557 Modificado |
| Volumen del molde (cm^3) | 943.3 | 943.3 |
| Diámetro del molde (mm) | 101.6 | 101.6 |
| No. capas | 3 | 5 |
| No. golpes por capa | 25 | 25 |
| Peso del martillo (N) | 24.4 | 44.5 |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

En el presente estudio, se realiza el ensayo de compactación con el procedimiento de Proctor modificado.

Los ensayos de compactación de suelos con proctor modificado, que se ejecutaron con las muestras de arcilla M3, M4 y M5, se realizaron acorde con ASTM D1557 "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort"

Los informes de laboratorio de estos ensayos son detallados en el Anexo 6. INF. No.19-0055-I. El resumen de los resultados de compactación de las muestras de arcillas M3, M4 y M5 se detalla en la Tabla 3.15.

TABLA 3. 15. DENSIDAD SECA MÁXIMA Y HUMEDA ÓPTIMA DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5.

| COMPACTACIÓN | | |
|---------------------|--|-------------------------------|
| ASTM D 1557 | | |
| MUESTRA | $\gamma_{d \text{ máx.}}$ (g/cm³) | Humedad óptima (%) |
| M3 | 1.526 | 25.36 |
| M4 | 1.640 | 19.66 |
| M5 | 1.634 | 17.56 |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

FIGURA 3. 13. ENSAYO DE COMPACTACIÓN.



Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

3.6.1.8 PERMEABILIDAD

Este ensayo permite conocer el valor del coeficiente de conductividad hidráulica o permeabilidad aplicando una carga que puede ser constante o variable (ASTM D2434, 2006).

La permeabilidad es un parámetro físico que permite describir la facilidad con la que un fluido por ejemplo el agua pasa a través de un medio filtrante que en este caso es el suelo, la permeabilidad se puede cuantificar mediante el coeficiente de permeabilidad. (Angelone, Garibay, & Cauhapé, 2006)

El coeficiente de conductividad hidráulica se expresa según la Ecuación 3.5

ECUACIÓN 3.5. COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD O CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

$$k = \frac{Q}{I \cdot A}$$

Donde:

k: coeficiente de conductividad hidráulica, cm/h

Q: caudal, cm³/h

I: gradiente, cm/cm

A: sección, cm²

Para las muestras naturales se empleó el método de permeabilidad con carga variable, ya que la condición de la muestra en ese estado permitía el flujo de agua con cargas de 120 cm. Sin embargo, para las muestras estabilizadas el ensayo de determinación del coeficiente de permeabilidad que se empleó fue el método de permeabilidad con carga constante, puesto que, no se evidenció flujo de agua aplicando las mismas cargas de las muestras naturales, por esta razón la carga aplicada a las muestras estabilizadas aumentó sustancialmente, como se lo menciona posteriormente en el literal 3.8.1.5.

FIGURA 3. 14. ENSAYO DE PERMEABILIDAD DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5.



Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

Los informes de laboratorio de estos ensayos son detallados en el Anexo 7. INF. No.19-0056-I. El resumen de los resultados de permeabilidad con carga variable de las muestras de arcillas M3, M4 y M5 se detalla en la Tabla

TABLA 3. 16. PERMEABILIDAD CON CARGA VARIABLE DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5.

| PERMEABILIDAD CON CARGA VARIABLE | | | |
|---|---------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| ASTM D2434 | | | |
| MUESTRA | ENSAYO | PERMEABILIDAD PROMEDIO | |
| | | K_t (cm/s) | K_{20} (cm/s) |
| M3 | 1 | 4.6959E-06 | 4.9338E-06 |
| | 2 | 3.3508E-06 | 3.5206E-06 |
| M4 | 1 | 1.1242E-06 | 1.1519E-06 |
| | 2 | 1.6502E-06 | 1.6910E-06 |
| M5 | 1 | 2.3830E-07 | 2.4041E-07 |
| | 2 | 1.3209E-07 | 1.4096E-07 |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

3.6.1.9 ÍNDICE DE EXPANSIÓN

Este método de prueba proporciona una manera sencilla pero sensible para evaluar el potencial de expansión de los suelos en aplicaciones prácticas de ingeniería, utilizando un parámetro de índice (ASTM D4829, 2011).

El índice de expansión (EI) en suelos, proporciona un indicador que permite conocer que tan expansivo es un suelo. Y en este estudio es importante acotar que es un parámetro fundamental para determinar si una arcilla expansiva se ha podido estabilizar. El potencial expansivo de un suelo se puede clasificar (ver Tabla 3.17) en función del valor de índice de expansión.

TABLA 3. 17. CLASIFICACIÓN DEL ÍNDICE DE EXPANSIÓN (EI).

| ÍNDICE DE EXPANSIÓN, EI | POTENCIAL EXPANSIVO |
|-------------------------|---------------------|
| 0-20 | MUY BAJO |
| 21-50 | BAJO |
| 51-90 | MEDIO |
| 91-130 | ALTO |
| >130 | MUY ALTO |

Fuente: (ASTM D4829, 2011)

Los ensayos de índice de expansión de suelos, que se ejecutaron con las muestras de arcillas M3, M4 y M5, se realizaron acorde con ASTM D4829 “Standard Test Method for Expansion Index of Soils”.

FIGURA 3. 15. ENSAYO DE ÍNDICE DE EXPANSIÓN.



Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

Los informes de laboratorio de estos ensayos son detallados en los Anexos del 8 al 13. INF. No.19-0057-I al INF. No.19-0062-I. El resumen de los resultados de índice de expansión de las muestras de arcillas M3, M4 y M5 se detalla en la Tabla 3.18.

TABLA 3. 18. ÍNDICE DE EXPANSIÓN DE LAS MUESTRAS DE ARCILLAS M3, M4 Y M5.

| ÍNDICE DE EXPANSIÓN | | |
|---------------------|------------------------|------------------------|
| ASTM D4829 | | |
| MUESTRA | ÍNDICE DE EXPANSIÓN EI | POTENCIAL DE EXPANSIÓN |
| M3 | 175.200 | MUY ALTO |
| | 175.850 | MUY ALTO |
| M4 | 134.825 | MUY ALTO |
| | 136.475 | MUY ALTO |
| M5 | 82.150 | MEDIO |
| | 83.350 | MEDIO |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

3.6.1.10 DIFRACCIÓN POR RAYOS X DE MUESTRAS NATURALES

La difracción de rayos X permite examinar mediante interferencias ópticas las composiciones y estructuras tridimensionales de diferentes materiales orgánicos e inorgánicos (materiales, fluidos, minerales, plásticos, cerámicas, etc), sin ocasionar daños a las muestras. (UA, 2019)

TABLA 3. 19. DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE MUESTRAS NATURALES.

| MINERAL | FÓRMULA | M3 Contenido (%) | M4 Contenido (%) | M5 Contenido (%) |
|--------------------|---|---------------------|---------------------|---------------------|
| Caolinita | $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$ | 30 | 25 | 15 |
| Cuarzo | SiO_2 | 16 | 20 | 25 |
| Grupo Plagioclasas | $(Na, Ca)Al(Si, Al)Si_2O_8$ | 13 | 15 | 24 |
| Diópsido | $CaMgSi_2O_6$ | 12 | 13 | 11 |
| Mordenita | $(Na_2, Ca, K_2)_4(Al_8Si_{40})O_{96} * 28H_2O$ | 7 | 8 | 9 |
| Muscovita | $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$ | 6 | 5 | 3 |
| Magnetita | Fe_3O_4 | 5 | 3 | 3 |
| Gypsum | $CaSO_4 * 2H_2O$ | 5 | 2 | 2 |

CONTINUACIÓN TABLA 3.19

| | | | | |
|-----------------|--|---|---|---|
| Cordierita | $Mg_2Al_4Si_5O_{18}$ | 2 | 1 | 1 |
| Montmorillonita | $(Na,Ca)_{0.3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2$ | 2 | 2 | 5 |
| Hematita | Fe_2O_3 | 1 | 1 | 1 |
| Ferropargasita | $NaCa_2Fe^{2+}_4AlSi_6Al_2O_{22}(OH)_2$ | 1 | 4 | 2 |
| Crossita | $Ca_2(Mg,Fe^{2+})_3(OH,F)_2Si_8O_{22}$ | 1 | 1 | 1 |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

3.6.2 ENSAYOS MECÁNICOS**3.6.2.1 CONSOLIDACIÓN**

Es la reducción gradual de volumen del suelo por compresión debido a la aplicación de esfuerzos. Es causado por la pérdida de aire o agua, o por un reajuste de las partículas sólidas del suelo (Das, 2015).

Clases de consolidación

Consolidación primaria, ocurre cuando se produce una reducción de volumen en el suelo debido a la expulsión del agua existente en la misma, cuando se ha aplicado una carga, en este fenómeno, se transfiere la carga soportada por el agua expulsada a las partículas sólidas del suelo (Duque & Escobar, 2016).

Consolidación secundaria, ocurre cuando la consolidación se da por el reajuste de las partículas sólidas del suelo, y luego de que la carga está casi totalmente soportada por éstas y no por el agua (Duque & Escobar, 2016).

Con el fin de establecer la relación entre la presión aplicada a un suelo, su deformación y el tiempo necesario para ello, se debe llevar a cabo la prueba de consolidación unidimensional originalmente ideada por el Dr. Karl von Terzaghi, a quién se debe la teoría de la consolidación. (Crespo, 2004)

La prueba consiste en aplicar carga a un espécimen de suelo confinado lateralmente, de tal manera que se deforme en una sola dirección, para la ejecución de la prueba existen varios modelos de aparatos; sin embargo, uno de los más comunes es el diseñado por el Dr. Arthur Casagrande y conocido como consolidómetro de anillo libre. (Crespo, 2004)

“Las deformaciones que sufre un espécimen bajo una carga aplicada se registran en un micrómetro, y un cronómetro permite conocer el tiempo que transcurre para alcanzar la deformación producida por el incremento de carga” (Crespo, 2004).

FIGURA 3. 16. ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5.



Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

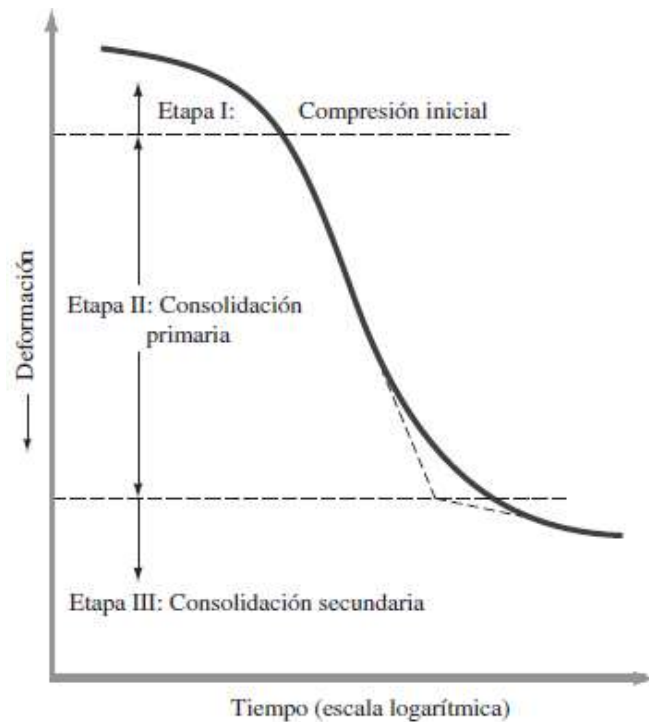
ETAPAS DE LA CONSOLIDACIÓN

Etapa I, causada por la precarga, Compresión inicial.

Etapa II, la presión del agua se transfiere gradualmente a las partículas del suelo (consolidación primaria).

Etapa III, se produce después de la expulsión total del agua, ocurre una deformación debido al reajuste plástico del suelo (consolidación secundaria).

FIGURA 3. 17. ETAPAS DE LA CONSOLIDACIÓN DE UN SUELO PARA UN INCREMENTO PARTICULAR DE CARGA



(Das, 2015)

Etapa I, causada por la precarga, Compresión inicial.

Etapa II, la presión del agua se transfiere gradualmente a las partículas del suelo (consolidación primaria).

Etapa III, se produce después de la expulsión total del agua, ocurre una deformación debido al reajuste plástico del suelo (consolidación secundaria).

Los ensayos de consolidación de suelos, que se ejecutaron con las muestras de arcillas M3, M4 y M5, se realizaron acorde con ASTM D2435 "Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading"

Los informes de laboratorio de estos ensayos son detallados en los Anexos del 14 al 19. INF. No.19-0063-I al INF. No.19-0068-I. El resumen de los resultados de consolidación de las muestras de arcillas M3, M4 y M5 se detalla en la Tabla 3.20, Tabla 3.21 y Tabla 3.22.

TABLA 3. 20. ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN DE LA MUESTRAS M3.

| ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN - MUESTRA M3 | | | | | | |
|--------------------------------------|--------|--------|-----------------------------------|--------|--------|--|
| ASTM D2436 | | | | | | |
| MUESTRA | M3 (1) | M3 (2) | MUESTRA | M3 (1) | M3 (2) | |
| DIÁMETRO (mm) | 50.00 | 50.00 | γ_s (g/cm ³) | 1.25 | 1.22 | |
| ÁREA (cm ²) | 19.63 | 19.63 | w_o (%) | 34.099 | 33.307 | |
| ALTURA (mm) | 20.00 | 20.00 | w_f (%) | 43.038 | 42.030 | |
| VOLUMEN (cm ³) | 39.27 | 39.27 | H _s (mm) | 8.95 | 8.78 | |
| G _s | 2.784 | 2.784 | H _v (mm) | 11.054 | 11.218 | |
| eo | 1.236 | 1.277 | V _s (cm ³) | 17.57 | 17.24 | |
| T ₉₀ | 0.848 | 0.848 | V _v (cm ³) | 21.70 | 22.03 | |
| γ_h (g/cm ³) | 1.670 | 1.630 | | | | |

| MUESTRA M3 ENSAYO 1 | | | | | | | MUESTRA M3 ENSAYO 2 | | | | | | |
|----------------------|--------------------|----------------------|---------------------|---|----------------------|--------------------|----------------------|---------------------|---|--|--|--|--|
| ALTURA DE VACÍOS Hv' | RELACIÓN VACÍOS e' | ALTURA PROMEDIO (mm) | t ₉₀ (s) | Cv t ₉₀ (mm ² /s) | ALTURA DE VACÍOS Hv' | RELACIÓN VACÍOS e' | ALTURA PROMEDIO (mm) | t ₉₀ (s) | Cv t ₉₀ (mm ² /s) | | | | |
| 11.054 | 1.236 | 18.791 | 27.04 | 2.768 | 11.218 | 1.277 | 19.183 | 20.25 | 3.853 | | | | |
| 8.636 | 0.965 | 17.354 | 22.09 | 2.890 | 9.584 | 1.091 | 18.184 | 21.16 | 3.313 | | | | |
| 8.180 | 0.914 | 16.815 | 11.56 | 5.185 | 9.220 | 1.050 | 17.746 | 12.25 | 5.450 | | | | |
| 7.558 | 0.845 | 16.135 | 7.29 | 7.570 | 8.707 | 0.991 | 17.121 | 6.76 | 9.193 | | | | |
| 6.819 | 0.762 | 15.321 | 5.76 | 8.639 | 7.971 | 0.908 | 16.341 | 7.29 | 7.765 | | | | |
| 5.931 | 0.663 | 15.094 | 13.69 | 3.528 | 7.147 | 0.814 | 16.139 | 7.84 | 7.043 | | | | |
| 6.364 | 0.711 | 15.545 | 31.36 | 1.633 | 7.566 | 0.862 | 16.605 | 28.09 | 2.081 | | | | |
| 6.833 | 0.764 | 16.491 | 1936.00 | 0.030 | 8.079 | 0.920 | 17.611 | 1681.00 | 0.039 | | | | |
| 8.256 | 0.923 | | | | 9.579 | 1.091 | | | | | | | |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

TABLA 3. 21. ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN DE LA MUESTRAS M4.

| ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN - MUESTRA M4 | | | | | | |
|--------------------------------------|--------|--------|---------------------------------|--------|--------|--|
| ASTM D2435 | | | | | | |
| MUESTRA | M4 (1) | M4 (2) | MUESTRA | M4 (1) | M4 (2) | |
| DIÁMETRO (mm) | 65.00 | 65.00 | γ_s (g/cm ³) | 1.27 | 1.33 | |
| ÁREA (cm ²) | 33.18 | 33.18 | wo (%) | 35.030 | 32.430 | |
| ALTURA (mm) | 20.00 | 20.00 | wf (%) | 50.178 | 34.130 | |
| VOLUMEN (cm ³) | 66.37 | 66.37 | Hs (mm) | 9.27 | 9.67 | |
| Gs | 2.747 | 2.747 | Hv (mm) | 10.731 | 10.334 | |
| eo | 1.158 | 1.069 | Vs (cm ³) | 30.76 | 32.08 | |
| T90 | 0.848 | 0.848 | Vv (cm ³) | 35.61 | 34.29 | |
| yh (g/cm ³) | 1.719 | 1.758 | | | | |

| MUESTRA M4 ENSAYO 1 | | | | MUESTRA M4 ENSAYO 2 | | | | | |
|----------------------|-----------------------|----------------------|---------|-----------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|---------|-----------------------------|
| ALTURA DE VACIOS Hv' | RELACIÓN DE VACIOS e' | ALTURA PROMEDIO (mm) | t90 (s) | Cv t90 (mm ² /s) | ALTURA DE VACIOS Hv' | RELACIÓN DE VACIOS e' | ALTURA PROMEDIO (mm) | t90 (s) | Cv t90 (mm ² /s) |
| 10.731 | 1.158 | 19.502 | 8.41 | 9.587 | 10.334 | 1.069 | 19.446 | 6.25 | 12.826 |
| 9.735 | 1.050 | 18.771 | 9.00 | 8.300 | 9.225 | 0.954 | 18.583 | 12.25 | 5.976 |
| 9.269 | 1.000 | 18.162 | 8.41 | 8.315 | 8.608 | 0.891 | 17.818 | 36.00 | 1.870 |
| 8.517 | 0.919 | 17.310 | 27.04 | 2.349 | 7.696 | 0.796 | 16.782 | 222.01 | 0.269 |
| 7.564 | 0.816 | 16.317 | 10.24 | 5.512 | 6.535 | 0.676 | 15.700 | 289.00 | 0.181 |
| 6.532 | 0.705 | 16.074 | 46.24 | 1.185 | 5.532 | 0.572 | 15.464 | 144.00 | 0.352 |
| 7.078 | 0.764 | 16.686 | 600.25 | 0.098 | 6.064 | 0.627 | 16.065 | 841.00 | 0.065 |
| 7.756 | 0.837 | 18.491 | 3906.25 | 0.019 | 6.734 | 0.697 | 18.049 | 0.00 | - |
| 10.687 | 1.153 | | | | 10.031 | 1.038 | | | |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

TABLA 3. 22. ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN DE LA MUESTRAS M5.

| ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN - MUESTRA 5 | | | | | | |
|-------------------------------------|--------|--------|---------------------------------|--------|--------|--|
| ASTM D2435 | | | | | | |
| MUESTRA | M5 (1) | M5 (2) | MUESTRA | M5 (1) | M5 (2) | |
| DIÁMETRO (mm) | 50.00 | 50.00 | γ_s (g/cm ³) | 1.24 | 1.28 | |
| ÁREA (cm ²) | 19.63 | 19.63 | w_o (%) | 34.189 | 32.595 | |
| ALTURA (mm) | 20.00 | 20.00 | w_f (%) | 41.848 | 38.782 | |
| VOLUMEN (cm ³) | 39.27 | 39.27 | H_s (mm) | 8.91 | 9.16 | |
| G_s | 2.784 | 2.784 | H_v (mm) | 11.091 | 10.835 | |
| e_o | 1.245 | 1.182 | V_s (cm ³) | 17.49 | 18.00 | |
| T90 | 0.848 | 0.848 | V_v (cm ³) | 21.78 | 21.27 | |
| γ_h (g/cm ³) | 1.664 | 1.692 | | | | |

| MUESTRA M3 ENSAYO 1 | | | | MUESTRA M3 ENSAYO 2 | | | | | |
|-------------------------|-------------------------|----------------------|--------------|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|---------|-------------------------------------|
| ALTURA DE VACIOS H_v' | RELACIÓN DE VACIOS e' | ALTURA PROMEDIO (mm) | t_{90} (s) | C_v t_{90} (mm ² /s) | ALTURA DE VACIOS H_v' | RELACIÓN DE VACIOS e' | ALTURA PROMEDIO (mm) | 190 (s) | C_v t_{90} (mm ² /s) |
| 11.091 | 1.245 | 19.494 | 7.84 | 10.275 | 10.835 | 1.182 | 19.472 | 7.84 | 10.253 |
| 10.078 | 1.131 | 18.701 | 4.00 | 18.536 | 9.779 | 1.067 | 18.571 | 4.41 | 16.579 |
| 9.506 | 1.067 | 17.908 | 6.25 | 10.878 | 9.033 | 0.986 | 17.728 | 24.01 | 2.775 |
| 8.492 | 0.953 | 16.940 | 9.61 | 6.330 | 8.092 | 0.883 | 16.777 | 26.01 | 2.294 |
| 7.569 | 0.850 | 16.050 | 146.41 | 0.373 | 7.131 | 0.778 | 15.863 | 262.44 | 0.203 |
| 6.712 | 0.753 | 15.871 | 14.44 | 3.698 | 6.265 | 0.684 | 15.664 | 249.64 | 0.209 |
| 7.211 | 0.809 | 16.430 | 784.00 | 0.073 | 6.773 | 0.739 | 16.254 | 784.00 | 0.071 |
| 7.831 | 0.879 | 17.606 | 0.00 | - | 7.404 | 0.808 | 17.476 | 0.00 | - |
| 9.563 | 1.073 | | | | 9.218 | 1.006 | | | |

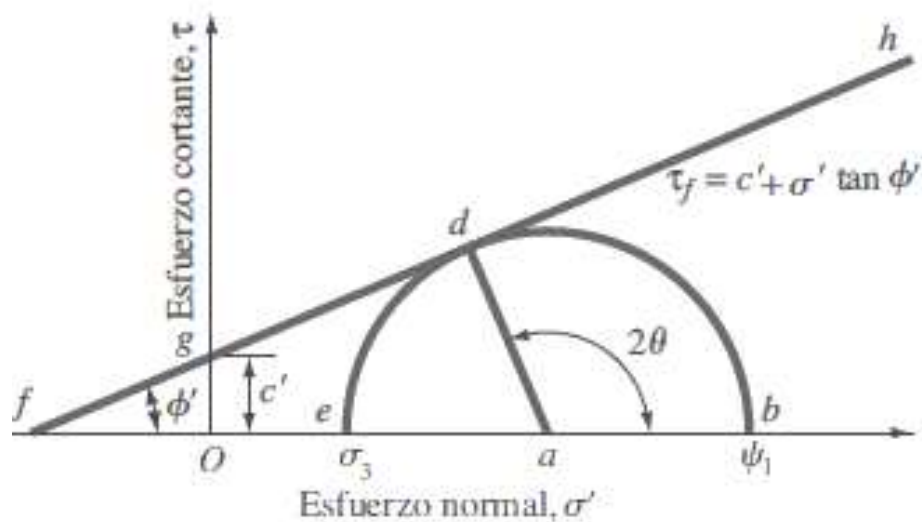
Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

3.6.2.2 CORTE DIRECTO

“La resistencia cortante de en un suelo es aquella resistencia interna por unidad de área que la masa de suelo puede ofrecer a la falla y el deslizamiento a lo largo de cualquier plano en su interior” (Das, 2015).

Para definir la resistencia al corte de suelos se utiliza la envolvente de falla de Mohr-Coulomb (ver Figura 3.18). Esta envolvente es una línea que puede representarse con la Ecuación 3.6, y permite conocer la cohesión y ángulo de fricción de los suelos (Aburto & Rodríguez, 2012).

FIGURA 3. 18. ENVOLVENTE DE FALLA DE MOHR COULOMB.



Fuente: (Das, 2015)

En el año 1773, Coulomb estableció, por primera vez, un criterio para definir el esfuerzo cortante, τ_f , en un elemento plano a través de un suelo, mediante la expresión (Jiménez & Justo, 1975).

ECUACIÓN 3. 6. ESFUERZO CORTANTE.

$$\tau_f = c + \sigma \cdot \tan \phi$$

Donde:

c: una constante llamada «cohesión» del suelo.

σ : la tensión normal al plano.

ϕ : una constante llamada «ángulo de rozamiento interno» del suelo.

Los ensayos de corte directo, que se ejecutaron con las arcillas M3, M4 y M5, se realizaron acorde con ASTM D3080 “Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions”

El ensayo de corte directo permite determinar el esfuerzo cortante en un suelo, consiste en un equipo con un anillo de corte de metal donde se puede remodelar o tallar al suelo (Figura 3.19). Los especímenes pueden ser cúbicos o cilíndricos, para este ensayo se remodelaron muestras de sección circular. El diámetro de las muestras utilizadas fue de 7.5 cm, es decir 44.18 cm² área transversal, y de 8 cm de altura. El anillo se divide en dos mitades. La fuerza normal se aplica sobre la parte superior del anillo de corte utilizando pesas. La fuerza de corte se aplica moviendo el anillo superior con respecto al anillo fijo para provocar una falla de corte en el espécimen. (Das, 2015)

Los esfuerzos normales aplicados para este ensayo tanto para muestras naturales como para las muestras estabilizadas fueron 0.5, 1.0 y 2.0 kg/cm², ya que las muestras fueron tomadas a profundidades inferiores a 1 m, siendo estos esfuerzos suficientes para simular las condiciones en las que se encontraba el suelo en el momento de su toma.

FIGURA 3. 19. ENSAYO DE CORTE DIRECTO DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5.



Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

Los informes de laboratorio de estos ensayos de corte directo son detallados en los Anexos 20, 21 y 22. INF. No.19-0069-I, INF. No.19-0070-I e INF. No.19-0071-I respectivamente. El resumen de los resultados de estos ensayos se detalla en la Tabla 3.23.

TABLA 3. 23. ENSAYO DE CORTE DIRECTO DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5.

| CORTE DIRECTO | | |
|----------------------|---------------------------------|------------------------------|
| ASTM D3080 | | |
| MUESTRA | φ (°) | c (kg/cm²) |
| M3 | 30.96 | 0.23 |
| M4 | 18.26 | 0.30 |
| M5 | 18.26 | 0.51 |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

3.7 MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO

El uso del Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) se inició en 1965, cuando Cambridge Instrument Co. lanzó el modelo de este tipo SEM (Renau-Piqueras & Faura, 1994).

El microscopio se encuentra constituido principalmente por tres partes:

- Emisor de electrones
- Una columna
- Lentes electromagnéticos

La función del emisor (cátodo de tungsteno) es producir un haz de electrones con aceleraciones que puede variar entre 200 V y 30 keV, el haz viaja por una columna a vacío de 10^{-4} Pa. La columna se encuentra formada internamente por una serie de lentes electromagnéticos por los cuales pasa el haz de luz y un sistema de deflexión que permite manipular el haz para llevar a cabo un barrido superficial de las muestras con idas y venidas, conservándolas íntegras (LINAN, 2019).

Este equipo tiene las siguientes utilidades:

- Análisis de la morfología y composición química de materiales
- Determina el tamaño de partículas
- Análisis de fisuras en materiales
- Detecta la presencia de contaminantes en metales, polímeros, cerámicas, etc
- Determina la textura y el deterioro en materiales.

FIGURA 3. 20. MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO



Fuente: (LINAN, 2019)

TABLA 3. 24. ANÁLISIS CON EL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO PARA MUESTRAS NATURALES.

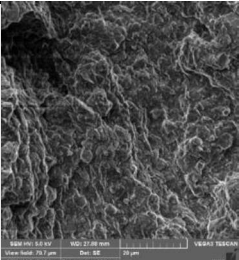
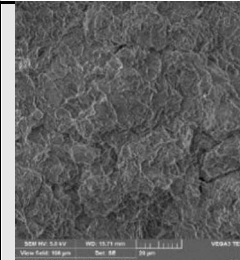
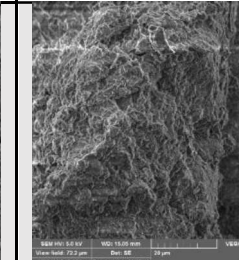
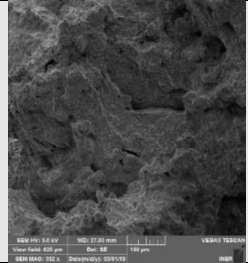
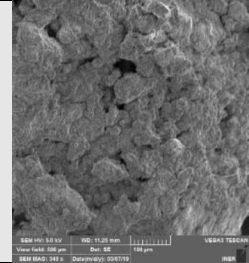
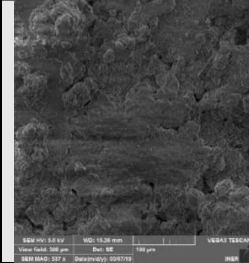
| ANÁLISIS RESOLUCIÓN (100 μm) | | | |
|--|---|--|---|
| | M3 | M4 | M5 |
| NATURAL |  |  |  |

TABLA 3.24. CONTINUACIÓN

| ANÁLISIS RESOLUCIÓN (20 μm) | | | |
|---|---|--|---|
| | M3 | M4 | M5 |
| NATURAL |  |  |  |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

3.8 ENSAYOS EN MUESTRAS DE ARCILLA ESTABILIZADA

3.8.1 ENSAYOS FÍSICOS

En la siguiente parte de este trabajo se presenta los resultados de los ensayos de suelos (Límites de Atterberg, Gravedad Específica, Compactación Proctor Modificado, Permeabilidad con las muestras de suelos M3, M4 y M5 dosificadas con el 10%, 20% y 30% de reemplazo de puzolana de ceniza volcánica (CV) y puzolana de ceniza de la cascarilla de arroz (CCA).

3.8.1.1 LÍMITES DE ATTERBERG DE LAS MUESTRAS M3, M4, M5 DOSIFICADAS

3.8.1.1.1 LÍMITE LÍQUIDO DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5 DOSIFICADAS

Los informes de laboratorio de estos ensayos son detallados en el Anexo 23. INF.18-0262-I. El resumen de los resultados de las muestras de arcillas M3, M4 y M5 dosificadas se detalla en la Tabla 3.25.

TABLA 3. 25. LÍMITE LÍQUIDO DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5 DOSIFICADAS.

| LÍMITE LÍQUIDO | | | |
|-----------------------|-------------------|---------------|------------------------|
| ASTM D 4318 | | | |
| Muestra | %Reemplazo | LL (%) | LL (%) prom |
| M3 | 10% | 74 | 74.0 |
| | | 74 | |
| | 20% | 63 | 63.0 |
| | | 63 | |
| | 30% | 60 | 60.5 |
| | | 61 | |
| M4 | 10% | 69 | 69.0 |
| | | 69 | |
| | 20% | 67 | 67.0 |
| | | 67 | |
| | 30% | 64 | 64.0 |
| | | 64 | |
| M5 | 10% | 69 | 69.0 |
| | | 69 | |
| | 20% | 54 | 54.5 |
| | | 55 | |
| | 30% | 57 | 56.5 |
| | | 56 | |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

3.8.1.1.2 LÍMITE PLÁSTICO DE LAS MUESTRAS M3, M4, M5 DOSIFICADAS

Los informes de laboratorio de estos ensayos son detallados en el Anexo 23. INF.18-0262-I. El resumen de los resultados de las muestras de arcillas M3, M4 y M5 dosificadas se detalla en la Tabla 3.26.

TABLA 3. 26. LÍMITE PLÁSTICO DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5 DOSIFICADAS.

| LÍMITE PLÁSTICO | | | |
|------------------------|--------------------|---------------|------------------------|
| ASTM D 4318 | | | |
| Muestra | % Reemplazo | LP (%) | LP (%) prom |
| M3 | 10% | 44 | 44.0 |
| | | 44 | |
| | 20% | 32 | 32.0 |
| | | 32 | |
| | 30% | 34 | 33.5 |
| | | 33 | |
| M4 | 10% | 30 | 30.0 |
| | | 30 | |
| | 20% | 31 | 31.0 |
| | | 31 | |
| | 30% | 26 | 26.0 |
| | | 26 | |
| M5 | 10% | 30 | 30.0 |
| | | 30 | |
| | 20% | 26 | 26.0 |
| | | 26 | |
| | 30% | 25 | 25.0 |
| | | 25 | |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

3.8.1.1.3 GRANULOMETRÍA POR LAVADO DE MUESTRAS M3, M4 Y M5 DOSIFICADAS

Los informes de laboratorio de estos ensayos son detallados en el Anexo 23. INF.18-0262-I. El resumen de los resultados de las muestras M3 dosificadas se detalla en la Tabla 3.27.

TABLA 3. 27. GRANULOMETRÍA POR LAVADO DE MUESTRAS M3 CON 10%, 20 Y 30% DE CCA Y CV

| GRANULOMETRÍA | | | | | | | |
|---------------|---------------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|
| ASTM D6913 | | | | | | | |
| Tamiz No. | Abertura Tamiz (mm) | Muestra M3-10% | | Muestra M3-20% | | Muestra M3-30% | |
| | | Peso Retenido (g) | Pasante (%) | Peso Retenido (g) | Pasante (%) | Peso Retenido (g) | Pasante (%) |
| No. 3/8 | 9.500 | - | - | - | - | - | - |
| No. 4 | 4.750 | 0.00 | 100.00 | 0.00 | 100.00 | 0.00 | 100.00 |
| No. 10 | 2.000 | 0.01 | 100.00 | 0.02 | 100.00 | 0.00 | 100.00 |
| No. 20 | 0.850 | 0.05 | 100.00 | 0.12 | 99.90 | 0.15 | 99.90 |
| No. 40 | 0.425 | 2.31 | 98.10 | 2.49 | 97.90 | 2.69 | 97.70 |
| No. 200 | 0.075 | 9.56 | 90.50 | 9.83 | 90.00 | 10.00 | 89.7 |
| Pasa 200 | - | 113.07 | - | 112.54 | - | 112.16 | - |
| | Total | 125.00 | | 125.00 | | 125.00 | |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

Los informes de laboratorio de estos ensayos son detallados en el Anexo 23. INF.18-0262-I. El resumen de los resultados de las muestras M4 dosificadas se detalla en la Tabla 3.28.

TABLA 3. 28. GRANULOMETRÍA POR LAVADO DE MUESTRAS M4 CON 10%, 20 Y 30% DE CCA Y CV

| GRANULOMETRÍA | | | | | | | |
|---------------|---------------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|
| ASTM D6913 | | | | | | | |
| Tamiz No. | Abertura Tamiz (mm) | Muestra M4-10% | | Muestra M4-20% | | Muestra M4-30% | |
| | | Peso Retenido (g) | Pasante (%) | Peso Retenido (g) | Pasante (%) | Peso Retenido (g) | Pasante (%) |
| No. 3/8 | 9.500 | - | - | - | - | - | - |
| No. 4 | 4.750 | 0.00 | 100.00 | 0.00 | 100.00 | 0.00 | 100.00 |
| No. 10 | 2.000 | 0.08 | 99.90 | 0.16 | 99.90 | 0.14 | 99.90 |
| No. 20 | 0.850 | 0.18 | 99.80 | 0.22 | 99.70 | 0.23 | 99.70 |
| No. 40 | 0.425 | 0.30 | 99.60 | 0.36 | 99.40 | 0.33 | 99.40 |
| No. 200 | 0.075 | 14.06 | 88.30 | 15.09 | 87.30 | 13.92 | 88.30 |
| Pasa 200 | - | 110.38 | - | 109.17 | - | 110.38 | - |
| | Total | 125.00 | | 125.00 | | 125.00 | |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

Los informes de laboratorio de estos ensayos son detallados en el Anexo 23. INF.18-0262-I. El resumen de los resultados de las muestras M5 dosificadas se detalla en la Tabla 3.29.

TABLA 3. 29. GRANULOMETRÍA POR LAVADO DE MUESTRAS M5 CON 10%, 20 Y 30% DE CCA Y CV

| GRANULOMETRÍA | | | | | | | |
|---------------|---------------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|
| ASTM D6913 | | | | | | | |
| Tamiz No. | Abertura Tamiz (mm) | Muestra M5-10% | | Muestra M5-20% | | Muestra M5-30% | |
| | | Peso Retenido (g) | Pasante (%) | Peso Retenido (g) | Pasante (%) | Peso Retenido (g) | Pasante (%) |
| No. 3/8 | 9.500 | 0.00 | 100.00 | 0.00 | 100.00 | - | - |
| No. 4 | 4.750 | 0.47 | 99.60 | 0.45 | 99.60 | 0.00 | 100.00 |
| No. 10 | 2.000 | 0.53 | 99.20 | 0.56 | 99.20 | 0.60 | 99.50 |
| No. 20 | 0.850 | 0.85 | 98.50 | 0.93 | 98.40 | 0.96 | 98.80 |
| No. 40 | 0.425 | 2.01 | 96.90 | 2.19 | 96.70 | 2.23 | 97.00 |
| No. 200 | 0.075 | 10.56 | 88.50 | 10.87 | 88.00 | 11.01 | 88.20 |
| Pasa 200 | - | 110.58 | - | 110.00 | - | 110.20 | - |
| | Total | 125.00 | | 125.00 | | 125.00 | |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

3.8.1.1.4 GRANULOMETRÍA POR HIDRÓMETRO DE MUESTRAS M3, M4 Y M5 DOSIFICADAS

Este ensayo no fue posible realizarlo en muestras combinadas, debido a que, la norma ASTM D7928-17 establece, en el literal 1.9.4, como método no aplicable en los suelos que presentan componentes aglomerantes, como:

- Cemento
- Cenizas volantes,
- Cal
- Otros aditivos de estabilización

3.8.1.1.5 ACTIVIDAD DE MUESTRAS M3, M4 Y M5 DOSIFICADAS

Este cálculo no fue posible realizarlo, puesto que, la fracción de suelo $< 2\mu$ no se pudo determinar mediante el ensayo de hidrómetro.

3.8.1.2 CLASIFICACIÓN SUCS

TABLA 3. 30. CLASIFICACIÓN SUCS DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5 DOSIFICADAS.

| CLASIFICACIÓN SUCS | | |
|---------------------------|------------------|-------------|
| ASTM D 4318 | | |
| MUESTRA | REEMPLAZO | SUCS |
| M3 | 10% | MH |
| | 20% | MH-CH |
| | 30% | MH-CH |
| M4 | 10% | CH |
| | 20% | CH |
| | 30% | CH |
| M5 | 10% | CH |
| | 20% | CH |
| | 30% | CH |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

3.8.1.3 GRAVEDAD ESPECÍFICA

Los informes de laboratorio de estos ensayos son detallados en el Anexo 24. INF.18-0261-I. El resumen de los resultados de las muestras de arcillas M3, M4 y M5 se detalla en la Tabla 3.31.

TABLA 3. 31. GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5 DOSIFICADAS.

| GRAVEDAD ESPECÍFICA | | | |
|---------------------|-----------|-------|---------|
| ASTM D 854 | | | |
| MUESTRA | Reemplazo | Gs | Gs prom |
| M3 | 10% | 2.725 | 2.727 |
| | | 2.728 | |
| | 20% | 2.685 | 2.684 |
| | | 2.683 | |
| | 30% | 2.639 | 2.639 |
| | | 2.639 | |
| M4 | 10% | 2.626 | 2.624 |
| | | 2.622 | |
| | 20% | 2.602 | 2.601 |
| | | 2.601 | |
| | 30% | 2.583 | 2.583 |
| | | 2.583 | |
| M5 | 10% | 2.621 | 2.623 |
| | | 2.624 | |
| | 20% | 2.584 | 2.582 |
| | | 2.580 | |
| | 30% | 2.554 | 2.553 |
| | | 2.552 | |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

3.8.1.4 COMPACTACIÓN PRÓCTOR MODIFICADO

Los informes de laboratorio de estos ensayos son detallados en el Anexo 25 INF.18-0264-I. El resumen de los resultados de las muestras de arcillas M3, M4 y M5 se detalla en la Tabla 3.32.

TABLA 3. 32. COMPACTACIÓN PRÓCTOR MODIFICADO DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5 DOSIFICADAS.

| COMPACTACIÓN | | | |
|--------------|-----------|--|-----------------------|
| ASTM D 1557 | | | |
| MUESTRA | REEMPLAZO | $\gamma_{d \text{ máx}}$ (g/cm ³) | Humedad óptima (%) |
| M3 | 10% | 1.473 | 24.77 |
| | 20% | 1.426 | 30.60 |
| | 30% | 1.461 | 23.91 |
| M4 | 10% | 1.568 | 21.86 |
| | 20% | 1.472 | 25.24 |
| | 30% | 1.491 | 18.57 |

CONTINUACIÓN TABLA 3.32

| | | | |
|----|-----|-------|-------|
| M5 | 10% | 1.542 | 18.93 |
| | 20% | 1.498 | 24.73 |
| | 30% | 1.469 | 19.30 |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

3.8.1.5 PERMEABILIDAD CON CARGA CONSTANTE

Para este ensayo se decidió cambiar el método de carga a variable debido que con carga variable no existió paso de agua a través del suelo. Al cambiar de método se pudo incrementar la carga de ensayo y observar si existe paso de agua a través de la arcilla.

Se aplicó a la muestra una presión de 3kg/cm² equivalente a un gradiente hidráulico de 431.65 por un período de 100 horas continuas, tiempo en el cual la muestra no presentó régimen permanente de flujo. El coeficiente de permeabilidad estimado es de 10E-9 cm/s.

Los informes de laboratorio de estos ensayos son detallados en el Anexo 26. INF.019-081-I. El resumen de los resultados de las muestras de arcillas M3, M4 y M5 se detalla en la Tabla 3.33.

TABLA 3. 33. PERMEABILIDAD CON CARGA CONSTANTE DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5 DOSIFICADAS.

| PERMEABILIDAD | | | |
|----------------------|---------------|-------------------|-----------------------------|
| ASTM D2434 | | | |
| MUESTRA | ENSAYO | K20 (cm/s) | RESULTADO DEL ENSAYO |
| M3 | 10% | - | NO PERMEABLE |
| | 20% | - | NO PERMEABLE |
| | 30% | - | NO PERMEABLE |
| M4 | 10% | - | NO PERMEABLE |
| | 20% | - | NO PERMEABLE |
| | 30% | - | NO PERMEABLE |
| M5 | 10% | - | NO PERMEABLE |
| | 20% | - | NO PERMEABLE |
| | 30% | 5.35795E-09 | PERMEABILIDAD MEDIA |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

3.8.1.6 ÍNDICE DE EXPANSIÓN

Los informes de laboratorio de estos ensayos son detallados en los Anexos del 27 al 44. INF.19-0091-I al INF.19-0172-I El resumen de los resultados de las muestras de arcillas M3, M4 y M5 se detalla en la Tabla 3.34.

TABLA 3. 34. ÍNDICE DE EXPANSIÓN DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5 DOSIFICADAS.

| ÍNDICE DE EXPANSIÓN | | | | | |
|---------------------|-----------|--------|------------------------|-----------------------------|------------------------|
| ASTM D4829 | | | | | |
| MUESTRA | REEMPLAZO | ENSAYO | ÍNDICE DE EXPANSIÓN EI | ÍNDICE DE EXPANSIÓN EI prom | POTENCIAL DE EXPANSIÓN |
| M3 | 10% | 1 | 101.000 | 102.925 | ALTO |
| | | 2 | 104.850 | | |
| | 20% | 1 | 67.075 | 67.438 | MEDIO |
| | | 2 | 67.800 | | |
| | 30% | 1 | 55.050 | 57.288 | MEDIO |
| | | 2 | 59.525 | | |
| M4 | 10% | 1 | 78.675 | 78.925 | MEDIO |
| | | 2 | 79.175 | | |
| | 20% | 1 | 72.550 | 73.55 | MEDIO |
| | | 2 | 74.550 | | |
| | 30% | 1 | 57.225 | 58.2875 | MEDIO |
| | | 2 | 59.350 | | |
| M5 | 10% | 1 | 66.250 | 67.038 | MEDIO |
| | | 2 | 67.825 | | |
| | 20% | 1 | 54.475 | 54.975 | MEDIO |
| | | 2 | 55.475 | | |
| | 30% | 1 | 48.575 | 48.575 | BAJO |
| | | 2 | 48.575 | | |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

3.8.2 ENSAYOS MECÁNICOS

3.8.2.1 CONSOLIDACIÓN

Los informes de laboratorio de estos ensayos son detallados en los Anexo del 45 al 53. INF.19-0100-I al INF.19-0108-I. El resumen de los resultados de las muestras de arcillas M3, M4 y M5 se detalla en la Tabla 3.35, Tabla 3.36 y Tabla 3.37.

TABLA 3. 35. RESUMEN ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN DE MUESTRA M3 10%, 20% Y 30%

| ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN - MUESTRA M3-10%,20%,30% | | | | | | |
|--|--------------------|----------------------|---------|-----------------------------|----------------------|--------------------|
| ASTM D2435 | | | | | | |
| MUESTRA | M3-10% | M3-20% | M3-30% | | | |
| DIÁMETRO (mm) | 50.00 | 50.00 | 50.00 | | | |
| ÁREA (cm ²) | 19.63 | 19.63 | 19.63 | | | |
| ALTURA (mm) | 20.00 | 19.40 | 19.40 | | | |
| VOLUMEN (cm ³) | 39.27 | 38.09 | 38.09 | | | |
| Gs | 2.727 | 2.684 | 2.639 | | | |
| eo | 0.946 | 0.934 | 0.877 | | | |
| T90 | 0.848 | 0.848 | 0.848 | | | |
| yh (g/cm ³) | 1.752 | 1.814 | 1.756 | | | |
| ys (g/cm ³) | 1.40 | 1.39 | 1.41 | | | |
| wo (%) | 25.005 | 30.685 | 24.911 | | | |
| wf (%) | 44.049 | 52.554 | 48.217 | | | |
| Hs (mm) | 10.28 | 10.03 | 10.33 | | | |
| Hv (mm) | 9.721 | 9.371 | 9.066 | | | |
| Vs (cm ³) | 20.18 | 19.69 | 20.29 | | | |
| Vv (cm ³) | 19.09 | 18.40 | 17.80 | | | |
| MUESTRA M3-10% | | | | | | |
| ALTURA DE VACÍOS Hv' | RELACIÓN VACÍOS e' | ALTURA PROMEDIO (mm) | 190 (s) | Cv 190 (mm ² /s) | ALTURA DE VACÍOS Hv' | RELACIÓN VACÍOS e' |
| 9.721 | 0.946 | 19.825 | 6.25 | 13.332 | 9.371 | 0.934 |
| 9.371 | 0.912 | 19.258 | 13.69 | 5.743 | 9.032 | 0.901 |
| 8.587 | 0.835 | 18.395 | 28.09 | 2.554 | 8.393 | 0.837 |
| 7.645 | 0.744 | 17.420 | 64.00 | 1.005 | 7.536 | 0.751 |
| 6.637 | 0.646 | 16.402 | 102.01 | 0.559 | 6.534 | 0.652 |
| 5.608 | 0.546 | 16.076 | 81.00 | 0.676 | 5.516 | 0.550 |
| 5.985 | 0.582 | 16.518 | 225.00 | 0.257 | 6.025 | 0.601 |
| 6.492 | 0.632 | 17.493 | - | - | 6.791 | 0.677 |
| 7.936 | 0.772 | 17.493 | - | - | 7.845 | 0.782 |
| MUESTRA M3-20% | | | | | | |
| ALTURA DE VACÍOS Hv' | RELACIÓN VACÍOS e' | ALTURA PROMEDIO (mm) | 190 (s) | Cv 190 (mm ² /s) | ALTURA DE VACÍOS Hv' | RELACIÓN VACÍOS e' |
| 9.066 | 0.877 | 19.230 | 5.76 | 13.611 | 9.371 | 0.934 |
| 8.859 | 0.857 | 18.741 | 7.84 | 9.498 | 9.032 | 0.901 |
| 8.368 | 0.810 | 17.994 | 11.56 | 5.938 | 8.393 | 0.837 |
| 7.518 | 0.728 | 17.064 | 72.25 | 0.854 | 7.536 | 0.751 |
| 6.555 | 0.634 | 16.054 | 96.04 | 0.569 | 6.534 | 0.652 |
| 5.509 | 0.533 | 15.800 | 134.55 | 0.393 | 5.516 | 0.550 |
| 6.118 | 0.592 | 16.437 | 121.00 | 0.473 | 6.025 | 0.601 |
| 6.917 | 0.669 | 17.347 | 0.00 | - | 6.791 | 0.677 |
| 7.973 | 0.771 | 17.347 | 0.00 | - | 7.845 | 0.782 |
| MUESTRA M3-30% | | | | | | |
| ALTURA DE VACÍOS Hv' | RELACIÓN VACÍOS e' | ALTURA PROMEDIO (mm) | 190 (s) | Cv 190 (mm ² /s) | ALTURA DE VACÍOS Hv' | RELACIÓN VACÍOS e' |
| 9.066 | 0.877 | 19.297 | 3.06 | 25.777 | 9.371 | 0.934 |
| 8.859 | 0.857 | 18.948 | 4.00 | 19.028 | 9.032 | 0.901 |
| 8.368 | 0.810 | 18.277 | 6.76 | 10.476 | 8.393 | 0.837 |
| 7.518 | 0.728 | 17.371 | 16.00 | 3.998 | 7.536 | 0.751 |
| 6.555 | 0.634 | 16.366 | 30.25 | 1.877 | 6.534 | 0.652 |
| 5.509 | 0.533 | 16.148 | 100.00 | 0.553 | 5.516 | 0.550 |
| 6.118 | 0.592 | 16.852 | 81.00 | 0.743 | 6.025 | 0.601 |
| 6.917 | 0.669 | 17.779 | - | - | 6.791 | 0.677 |
| 7.973 | 0.771 | 17.779 | - | - | 7.845 | 0.782 |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

TABLA 3. 36. RESUMEN ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN DE MUESTRA M4 10%, 20% Y 30%

| ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN - MUESTRA M4-10%,20%,30% | | | | | | | | | |
|--|--------------------|----------------------|---------|-----------------------------|---------------------------|--------------------|----------------------|---------|-----------------------------|
| ASTM D2435 | | | | | | | | | |
| MUESTRA | | M4-10% | M4-20% | M4-30% | | | | | |
| DIÁMETRO (mm) | | 50.00 | 50.00 | 50.00 | | | | | |
| ÁREA (cm ²) | | 19.63 | 19.63 | 19.63 | | | | | |
| ALTURA (mm) | | 20.00 | 20.00 | 20.00 | | | | | |
| VOLUMEN (cm ³) | | 39.27 | 39.27 | 39.27 | | | | | |
| Gs | | 2.624 | 2.602 | 2.583 | | | | | |
| eo | | 0.762 | 0.752 | 0.712 | | | | | |
| T90 | | 0.848 | 0.848 | 0.848 | | | | | |
| yh (g/cm ³) | | 1.826 | 1.861 | 1.797 | | | | | |
| ys (g/cm ³) | | 1.49 | 1.48 | 1.51 | | | | | |
| w _o (%) | | 22.608 | 25.386 | 19.099 | | | | | |
| w _f (%) | | 37.689 | 32.209 | 27.776 | | | | | |
| H _s (mm) | | 11.35 | 11.41 | 11.68 | | | | | |
| H _v (mm) | | 8.649 | 8.587 | 8.317 | | | | | |
| V _s (cm ³) | | 22.29 | 22.41 | 22.94 | | | | | |
| V _v (cm ³) | | 16.98 | 16.86 | 16.33 | | | | | |
| MUESTRA M4-10% | | | | | | | | | |
| ALTURA DE VACIOS HV' (mm) | RELACIÓN VACIOS e' | ALTURA PROMEDIO (mm) | t90 (s) | Cv t90 (mm ² /s) | ALTURA DE VACIOS HV' (mm) | RELACIÓN VACIOS e' | ALTURA PROMEDIO (mm) | t90 (s) | Cv t90 (mm ² /s) |
| 8.649 | 0.762 | 19.178 | 4.00 | 19.492 | 8.587 | 0.752 | 19.213 | 8.41 | 9.305 |
| 7.004 | 0.617 | 18.006 | 16.00 | 4.296 | 7.014 | 0.615 | 18.115 | 15.21 | 4.574 |
| 6.306 | 0.556 | 17.244 | 9.00 | 7.004 | 6.391 | 0.560 | 17.465 | 6.25 | 10.347 |
| 5.479 | 0.483 | 16.382 | 6.25 | 9.103 | 5.715 | 0.501 | 16.785 | 15.21 | 3.927 |
| 4.582 | 0.404 | 15.472 | 125.44 | 0.405 | 5.030 | 0.441 | 16.072 | 30.25 | 1.810 |
| 3.660 | 0.322 | 15.215 | 33.06 | 1.484 | 4.288 | 0.376 | 15.845 | 10.89 | 4.888 |
| 4.068 | 0.358 | 15.740 | 351.56 | 0.149 | 4.576 | 0.401 | 16.232 | 127.69 | 0.437 |
| 4.710 | 0.415 | 16.708 | 0.00 | - | 5.061 | 0.443 | 17.238 | 0.00 | - |
| 6.003 | 0.529 | | | | 6.589 | 0.577 | | | |
| MUESTRA M4-20% | | | | | | | | | |
| ALTURA DE VACIOS HV' (mm) | RELACIÓN VACIOS e' | ALTURA PROMEDIO (mm) | t90 (s) | Cv t90 (mm ² /s) | ALTURA DE VACIOS HV' (mm) | RELACIÓN VACIOS e' | ALTURA PROMEDIO (mm) | t90 (s) | Cv t90 (mm ² /s) |
| 8.317 | 0.712 | 19.856 | 2.56 | 32.648 | 8.029 | 0.687 | 19.571 | 9.00 | 9.023 |
| 7.748 | 0.663 | 19.183 | 5.29 | 14.748 | 7.253 | 0.621 | 18.678 | 5.76 | 12.841 |
| 6.739 | 0.577 | 18.145 | 73.96 | 0.944 | 6.186 | 0.529 | 18.005 | 16.00 | 4.295 |
| 6.459 | 0.553 | 18.320 | 96.04 | 0.741 | 6.816 | 0.583 | 18.915 | 0.00 | - |
| 7.649 | 0.655 | | | | | | | | |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

TABLA 3. 37. RESUMEN ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN DE MUESTRA M5 10%, 20% Y 30%.

| ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN - MUESTRA M5-10%,20%,30% ASTM D2435 | | | | | | | | | |
|--|--------------------|----------------------|---------|-----------------------------|---------------------|--------------------|----------------------|---------|-----------------------------|
| MUESTRA | | M5-10% | M5-20% | M5-30% | | | | | |
| DIÁMETRO (mm) | | 50.00 | 50.00 | 50.00 | | | | | |
| ÁREA (cm ²) | | 19.63 | 19.63 | 19.63 | | | | | |
| ALTURA (mm) | | 20.00 | 20.00 | 20.00 | | | | | |
| VOLUMEN (cm ³) | | 39.27 | 39.27 | 39.27 | | | | | |
| Gs | | 2.623 | 2.581 | 2.553 | | | | | |
| eo | | 0.823 | 0.794 | 0.732 | | | | | |
| T90 | | 0.848 | 0.843 | 0.848 | | | | | |
| γh (g/cm ³) | | 1.717 | 1.797 | 1.760 | | | | | |
| γs (g/cm ³) | | 1.44 | 1.44 | 1.47 | | | | | |
| w _o (%) | | 19.306 | 24.863 | 19.437 | | | | | |
| w _f (%) | | 23.890 | 29.411 | 26.071 | | | | | |
| H _s (mm) | | 10.97 | 11.15 | 11.55 | | | | | |
| H _v (mm) | | 9.027 | 8.851 | 8.454 | | | | | |
| V _s (cm ³) | | 21.55 | 21.89 | 22.67 | | | | | |
| V _v (cm ³) | | 17.72 | 17.33 | 16.60 | | | | | |
| MUESTRA M5-10% | | | | | | | | | |
| ALTURA DE VACIOS Hr | RELACIÓN VACIOS e' | ALTURA PROMEDIO (mm) | t90 (s) | Cv 190 (mm ² /s) | ALTURA DE VACIOS Hr | RELACIÓN VACIOS e' | ALTURA PROMEDIO (mm) | t90 (s) | Cv 190 (mm ² /s) |
| 9.027 | 0.823 | 19.744 | 2.25 | 36.732 | 8.851 | 0.794 | 19.806 | 1.69 | 49.207 |
| 8.515 | 0.776 | 19.297 | 4.00 | 19.736 | 8.462 | 0.759 | 19.427 | 4.00 | 20.003 |
| 8.132 | 0.741 | 18.861 | 4.00 | 18.854 | 8.094 | 0.726 | 19.042 | 4.41 | 17.432 |
| 7.644 | 0.697 | 18.357 | 8.41 | 8.494 | 7.693 | 0.690 | 18.596 | 6.25 | 11.730 |
| 7.123 | 0.649 | 17.759 | 31.36 | 2.132 | 7.202 | 0.646 | 18.010 | 43.56 | 1.579 |
| 6.448 | 0.588 | 17.575 | 47.61 | 1.375 | 6.520 | 0.585 | 17.787 | 40.96 | 1.637 |
| 6.755 | 0.616 | 17.931 | 196.00 | 0.348 | 6.755 | 0.606 | 18.058 | 96.04 | 0.720 |
| 7.160 | 0.652 | 18.564 | 0.00 | - | 7.063 | 0.634 | 18.557 | 0.00 | - |
| 8.022 | 0.731 | 18.564 | 0.00 | - | 7.813 | 0.701 | 18.557 | 0.00 | - |
| MUESTRA M5-20% | | | | | | | | | |
| ALTURA DE VACIOS Hr | RELACIÓN VACIOS e' | ALTURA PROMEDIO (mm) | t90 (s) | Cv 190 (mm ² /s) | ALTURA DE VACIOS Hr | RELACIÓN VACIOS e' | ALTURA PROMEDIO (mm) | t90 (s) | Cv 190 (mm ² /s) |
| 8.454 | 0.732 | 19.860 | 1.96 | 42.663 | 8.175 | 0.708 | 19.538 | 2.88 | 28.003 |
| 7.810 | 0.676 | 19.116 | 1.96 | 39.526 | 7.330 | 0.635 | 18.630 | 5.76 | 12.774 |
| 6.837 | 0.592 | 18.104 | 12.25 | 5.672 | 6.280 | 0.544 | 17.923 | 8.41 | 8.098 |
| 6.474 | 0.561 | 18.157 | 25.00 | 2.796 | 6.749 | 0.584 | 18.748 | 0.00 | - |
| 7.655 | 0.663 | 18.748 | 0.00 | - | 7.655 | 0.663 | 18.748 | 0.00 | - |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

3.8.2.2 CORTE DIRECTO

Los informes de laboratorio de estos ensayos son detallados en los Anexos del 54 al 62. INF.19-0082-I al INF.19-0090-I. El resumen de los resultados de las muestras de arcillas M3, M4 y M5 se detalla en la Tabla 3.38.

TABLA 3. 38. CORTE DIRECTO DE LAS MUESTRAS M3, M4 Y M5 DOSIFICADAS.

| CORTE DIRECTO | | | |
|----------------------|--------------------|------------------------------|------------------------------|
| ASTM D3080 | | | |
| MUESTRA | % Reemplazo | ϕ (°) | c (kg/cm²) |
| M3 | 10% | 41.67 | 1.027 |
| | 20% | 50.43 | 0.900 |
| | 30% | 51.34 | 0.870 |
| M4 | 10% | 46.12 | 1.240 |
| | 20% | 50.89 | 0.975 |
| | 30% | 54.65 | 0.945 |
| M5 | 10% | 31.80 | 0.950 |
| | 20% | 36.87 | 1.310 |
| | 30% | 45.00 | 1.340 |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1 RESULTADOS DE MUESTRAS NATURALES Y MUESTRAS ESTABILIZADAS

En este capítulo se muestra los resultados experimentales de las muestras de arcilla M3, M4 y M5 de la provincia de Manabí en estado natural, así como los resultados de los mismos suelos, habiendo usado las dosificaciones propuestas en el presente trabajo.

Como se mencionó en el capítulo 3, las dosificaciones de puzolana corresponden al reemplazo en peso de arcilla por puzolanas de CCA y CV en 10%, 20% y 30% en composiciones iguales

Después de haber realizado la preparación de cada arcilla con su respectiva dosificación se realizaron varios ensayos de laboratorio con el fin de poder determinar las propiedades físicas y mecánicas de cada muestra y realizar de esta forma un análisis comparativo que permita conocer qué dosificación es la óptima para la estabilización de arcillas expansivas.

Las variaciones en los resultados de los ensayos: límite líquido, límite plástico, gravedad específica, compactación Proctor modificado, permeabilidad, índice de expansión, consolidación y corte directo, se puede definir el porcentaje de reemplazo ideal para la estabilización.

4.1.1 LÍMITE LÍQUIDO

El resumen de los ensayos de límite líquido de las muestras naturales y las muestras dosificadas se presenta en la Tabla 4.1, donde se puede apreciar una reducción del valor del límite líquido para las muestras M3 y M4 a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo por puzolanas en las muestras de ensayo.

Sin embargo, los resultados de límite líquido para la muestra M5 presentan variaciones de incremento y reducción para los diferentes porcentajes de reemplazo.

TABLA 4. 1. RESUMEN LÍMITE LÍQUIDO DE MUESTRAS NATURALES Y MUESTRAS ESTABILIZADAS.

| LÍMITE LÍQUIDO | | | |
|-----------------------|------------------|--------------------|--------------------|
| ASTM D 4318 | | | |
| MUESTRA | REEMPLAZO | LL (%) prom | % REDUCCIÓN |
| M3 | 0% | 89.0 | 0.00 |
| | 10% | 74.0 | 16.85 |
| | 20% | 63.0 | 29.21 |
| | 30% | 60.5 | 32.02 |
| M4 | 0% | 83.0 | 0.00 |
| | 10% | 69.0 | 16.87 |
| | 20% | 67.0 | 19.28 |
| | 30% | 64.0 | 22.89 |
| M5 | 0% | 67.0 | 0.00 |
| | 10% | 69.0 | 2.99 |
| | 20% | 54.5 | 18.66 |
| | 30% | 56.5 | 15.67 |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

4.1.2 LÍMITE PLÁSTICO

El resumen de los ensayos de límite plástico de las muestras naturales y las muestras dosificadas se detalla en la Tabla 4.2, donde se puede apreciar una reducción del valor del límite plástico para la muestra M4 a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo por puzolanas. Sin embargo, para las muestras M3 y M5, los valores de límite plástico incrementan del porcentaje de reemplazo 0% al porcentaje de reemplazo 10%, y para los porcentajes de 20% y 30% de reemplazo existe una reducción en LP.

TABLA 4. 2. RESUMEN LÍMITE PLÁSTICO DE MUESTRAS NATURALES Y MUESTRAS ESTABILIZADAS.

| LÍMITE PLÁSTICO | | | |
|------------------------|------------------|--------------------|--------------------|
| ASTM D 4318 | | | |
| Muestra | Reemplazo | LP (%) prom | % Variación |
| M3 | 0% | 37.0 | 0.00 |
| | 10% | 44.0 | 18.92 |

TABLA 4.2. CONTINUACIÓN

| | | | |
|-----------|-----|------|-------|
| | 20% | 32.0 | 13.51 |
| | 30% | 33.5 | 9.46 |
| M4 | 0% | 30.0 | 0.0% |
| | 10% | 30.0 | 0.0% |
| | 20% | 31.0 | 3.3% |
| | 30% | 26.0 | 13.3% |
| | 0% | 24.0 | 0.0% |
| M5 | 10% | 30.0 | 25.0% |
| | 20% | 26.0 | 8.3% |
| | 30% | 25.0 | 4.2% |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

4.1.3 GRAVEDAD ESPECÍFICA

El resumen de los ensayos de gravedad específica de las muestras naturales y las muestras dosificadas se detalla en la Tabla 4.3.

En la tabla se puede apreciar una reducción del valor de la gravedad específica en las diferentes muestras a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo por puzolanas.

TABLA 4. 3. RESUMEN GRAVEDAD ESPECÍFICA DE MUESTRAS NATURALES Y MUESTRAS ESTABILIZADAS.

| GRAVEDAD ESPECÍFICA | | | |
|---------------------|-----------|------------|------------------|
| ASTM D 854-14 | | | |
| MUESTRA | REEMPLAZO | Gs prom | %VARIACIÓN Gs |
| M3 | 0% | 2.784 | 0.0% |
| | 10% | 2.727 | 2.0% |
| | 20% | 2.684 | 3.6% |
| | 30% | 2.639 | 5.2% |
| M4 | 0% | 2.747 | 0.0% |
| | 10% | 2.624 | 4.5% |
| | 20% | 2.601 | 5.3% |
| | 30% | 2.583 | 6.0% |
| M5 | 0% | 2.784 | 0.0% |
| | 10% | 2.623 | 5.8% |
| | 20% | 2.582 | 7.3% |
| | 30% | 2.553 | 8.3% |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

4.1.4 COMPACTACIÓN PRÓCTOR MODIFICADO

El resumen de los ensayos de compactación de las muestras naturales y las muestras dosificadas se detalla en la Tabla 4.4.

En la Tabla 4.4 se puede evidenciar una reducción del valor de la densidad máxima seca en las diferentes muestras a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo de puzolanas. Además, es interesante observar que cuando se realiza la dosificación con el 20% de reemplazo de puzolanas, los especímenes necesitan una mayor cantidad de agua para llegar a la densidad seca máxima. Los valores de la densidad máxima seca se reducen conforme incrementa el porcentaje de reemplazo por puzolana.

TABLA 4. 4. RESUMEN COMPACTACIÓN PRÓCTOR MODIFICADO DE MUESTRAS NATURALES Y MUESTRAS ESTABILIZADAS.

| COMPACTACIÓN | | | | |
|--------------|-----------|--|--------------------------|---|
| ASTM D 1557 | | | | |
| MUESTRA | REEMPLAZO | γ_d máx (g/cm ³) | HUMEDAD ÓPTIMA (%) | %VARIACIÓN γ_d máx (g/cm ³) |
| M3 | 0% | 1.526 | 25.36 | 0.0% |
| | 10% | 1.473 | 24.77 | 2.3% |
| | 20% | 1.426 | 30.60 | 20.7% |
| | 30% | 1.461 | 23.91 | 5.7% |
| M4 | 0% | 1.640 | 19.66 | 0.0% |
| | 10% | 1.568 | 21.86 | 11.2% |
| | 20% | 1.472 | 25.24 | 28.4% |
| | 30% | 1.491 | 18.57 | 5.5% |
| M5 | 0% | 1.634 | 17.56 | 0.0% |
| | 10% | 1.542 | 18.93 | 7.8% |
| | 20% | 1.498 | 24.73 | 40.8% |
| | 30% | 1.469 | 19.30 | 9.9% |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

4.1.5 PERMEABILIDAD

El resumen de los ensayos de permeabilidad de las muestras naturales y las muestras dosificadas se detalla en la Tabla 4.5.

En la Tabla 4.5 se puede evidenciar que, al momento de realizar un reemplazo por puzolana en las arcillas, éstas, indistintamente del porcentaje utilizado en la dosificación. Los diferentes especímenes dosificados se catalogaron como impermeables debido a que no se visualizó flujo permanente de agua a pesar de, la presión de 3 Kg/cm² (3000 cm) utilizada por un período de 100 horas, mientras en las muestras naturales se pudo determinar un coeficiente de permeabilidad con cargas de 120 cm. Cabe destacar que la muestra M5 es impermeable para los porcentajes de reemplazo de 10% y 20% mientras que para el porcentaje de 30% al igual que la muestra natural existió presencia de flujo permanente.

Otro parámetro que es importante destacar es la relación de vacíos, los valores disminuyeron conforme se aumentaba el porcentaje de reemplazo de puzolana, lo que va acorde a la pérdida de permeabilidad en las muestras naturales ya que existe una reducción del volumen de espacios vacíos respecto al volumen de la muestra.

TABLA 4. 5. RESUMEN PERMEABILIDAD DE MUESTRAS NATURALES Y MUESTRAS ESTABILIZADAS.

| PERMEABILIDAD | | | | |
|----------------------|---------------|-------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| ASTM D2434 | | | | |
| MUESTRA | ENSAYO | K20 (cm/s) | RELACIÓN DE VACÍOS e | %VARIACIÓN e |
| M3 | 0% | 4.2272E-06 | 1.257 | 0.0% |
| | 10% | NO PERMEABLE | 0.947 | 24.6% |
| | 20% | NO PERMEABLE | 0.934 | 25.7% |
| | 30% | NO PERMEABLE | 0.879 | 30.1% |
| M4 | 0% | 1.4215E-06 | 1.117 | 0.0% |
| | 10% | NO PERMEABLE | 0.762 | 31.8% |
| | 20% | NO PERMEABLE | 0.754 | 32.5% |
| | 30% | NO PERMEABLE | 0.716 | 35.9% |
| M5 | 0% | 1.9069E-07 | 1.257 | 0.0% |
| | 10% | NO PERMEABLE | 0.824 | 34.5% |
| | 20% | NO PERMEABLE | 0.792 | 37.0% |
| | 30% | 5.35795E-09 | 0.733 | 41.7% |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

4.1.6 ÍNDICE DE EXPANSIÓN

El resumen de resultados de los ensayos de índice de expansión de las muestras naturales y las muestras dosificadas se detalla en la Tabla 4.6.

En la tabla se puede apreciar una reducción del valor del índice de expansión en las diferentes muestras a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo de puzolanas.

Es importante analizar que, debido al aumento del porcentaje de reemplazo por puzolanas de ceniza de cascarilla de arroz y puzolana de ceniza volcánica, el potencial de expansión disminuye, haciendo que muestras como la M3 y M4, que tienen un muy alto potencial de expansión, disminuyan su comportamiento a un potencial medio de expansión, y en una muestra con potencial de expansión medio, así como la muestra M5 reduzca un comportamiento a un potencial bajo de expansión.

Este parámetro es muy importante para determinar si el uso de estas puzolanas funciona como un método efectivo de estabilización.

TABLA 4. 6. RESUMEN ENSAYO DE ÍNDICE DE EXPANSIÓN DE MUESTRAS NATURALES Y MUESTRAS ESTABILIZADAS

| ÍNDICE DE EXPANSIÓN | | | | | | |
|---------------------|-----------|--------|------------------------|-----------------------------|------------------------|---------------|
| ASTM D4829-11 | | | | | | |
| MUESTRA | REEMPLAZO | ENSAYO | ÍNDICE DE EXPANSIÓN EI | ÍNDICE DE EXPANSIÓN EI prom | POTENCIAL DE EXPANSIÓN | %REDUCCIÓN EI |
| M3 | 0% | 1 | 175.200 | 175.525 | MUY ALTO | 0.0% |
| | | 2 | 175.850 | | | |
| | 10% | 1 | 101.000 | 102.925 | ALTO | 41.4% |
| | | 2 | 104.850 | | | |
| | 20% | 1 | 67.075 | 67.438 | MEDIO | 61.6% |
| | | 2 | 67.800 | | | |
| 30% | 1 | 55.050 | 57.288 | MEDIO | 67.4% | |
| | 2 | 59.525 | | | | |
| M4 | 0% | 1 | 134.825 | 135.65 | MUY ALTO | 0.0% |
| | | 2 | 136.475 | | | |
| | 10% | 1 | 78.675 | 78.925 | MEDIO | 41.8% |
| | | 2 | 79.175 | | | |
| | 20% | 1 | 72.550 | 73.55 | MEDIO | 45.8% |
| | | 2 | 74.550 | | | |

TABLA 4.6. CONTINUACIÓN.

| | | | | | | |
|----|-----|---|--------|--------|-------|-------|
| M5 | 0% | 1 | 82.150 | 82.750 | MEDIO | 0.0% |
| | | 2 | 83.350 | | | |
| | 10% | 1 | 66.250 | 67.038 | MEDIO | 19.0% |
| | | 2 | 67.825 | | | |
| | 20% | 1 | 54.475 | 54.975 | MEDIO | 33.6% |
| | | 2 | 55.475 | | | |
| | 30% | 1 | 48.575 | 48.575 | BAJO | 41.3% |
| | | 2 | 48.575 | | | |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

4.1.7 CONSOLIDACIÓN

En análisis de la consolidación se muestra a continuación.

- Tabla 4.7

Existe reducción de los espacios vacíos conforme incrementa el porcentaje de reemplazo por puzolana.

Los valores de t_{90} disminuyen conforme incrementa el porcentaje de reemplazo por puzolanas, es decir, con cada incremento del porcentaje de puzolana se evidencia más rápido el 90% de la consolidación.

Los valores de C_v (coeficiente de consolidación), aumentan conforme incrementa el porcentaje de reemplazo por puzolana, es decir, la velocidad para llegar al 90% de la consolidación incrementa junto con el incremento del porcentaje de puzolanas

- Tabla 4.8

Existe reducción de los espacios vacíos en las muestras dosificadas con respecto a la muestra natural, pero no existe una tendencia clara de que con el incremento de dosificación la relación de vacíos cambie gradualmente

En el caso del análisis de t_{90} en esta muestra no se pudo evidenciar una tendencia clara, ya que los resultados presentan un orden aleatorio, por lo que no es posible definir el comportamiento

Los valores de C_v (coeficiente de consolidación) no presentan una tendencia clara en esta muestra, en algunas muestras dosificadas el valor de C_v es mayor que en la muestra natural y en otros casos no.

- Tabla 4.9

Existe reducción de los espacios vacíos conforme incrementa el porcentaje de reemplazo por puzolana.

Los valores de t_{90} disminuyen conforme incrementa el porcentaje de reemplazo por puzolanas, es decir, con cada incremento del porcentaje de puzolana se evidencia más rápido el 90% de la consolidación.

Los valores de C_v (coeficiente de consolidación), aumentan en la mayoría de las pruebas conforme incrementa el porcentaje de reemplazo por puzolana, es decir, la velocidad para llegar al 90% de la consolidación incrementa junto con el incremento del porcentaje de puzolanas.

TABLA 4. 7. RESUMEN ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN DE MUESTRA M3 0%, 10%, 20% Y 30%

| ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN - MUESTRA M3-10%,20%,30% | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---------|-------------------------|--------------------|---------|-------------------------|--------------------|---------|-------------------------|--------------------|---------|-------------------------|--------------------|---------|-------------------------|
| ASTM D2435 | | | | | | | | | | | | | | |
| MUESTRA | | M3-0% | | M3-10% | | M3-20% | | M3-30% | | | | | | |
| DIÁMETRO (mm) | | 50.00 | | 50.00 | | 50.00 | | 50.00 | | | | | | |
| ÁREA (cm ²) | | 19.63 | | 19.63 | | 19.63 | | 19.63 | | | | | | |
| ALTURA (mm) | | 20.00 | | 20.00 | | 19.40 | | 19.40 | | | | | | |
| VOLUMEN (cm ³) | | 39.27 | | 39.27 | | 38.09 | | 38.09 | | | | | | |
| Gs | | 2.78 | | 2.727 | | 2.684 | | 2.639 | | | | | | |
| eo | | 1.24 | | 0.946 | | 0.934 | | 0.877 | | | | | | |
| T90 | | 0.85 | | 0.848 | | 0.848 | | 0.848 | | | | | | |
| yh (g/cm ³) | | 1.67 | | 1.752 | | 1.814 | | 1.756 | | | | | | |
| vs (g/cm ³) | | 1.25 | | 1.40 | | 1.39 | | 1.41 | | | | | | |
| wo (%) | | 34.10 | | 25.005 | | 30.685 | | 24.911 | | | | | | |
| wf (%) | | 43.04 | | 44.049 | | 52.554 | | 48.217 | | | | | | |
| Hs (mm) | | 8.95 | | 10.28 | | 10.03 | | 10.33 | | | | | | |
| Hv (mm) | | 11.05 | | 9.721 | | 9.371 | | 9.066 | | | | | | |
| Vs (cm ³) | | 17.57 | | 20.18 | | 19.69 | | 20.29 | | | | | | |
| Vv (cm ³) | | 21.70 | | 19.09 | | 18.40 | | 17.90 | | | | | | |
| | | MUESTRA M3 0% | | | MUESTRA M3-10% | | | MUESTRA M3-20% | | | MUESTRA M3-30% | | | |
| RELACION VACIOS e' | t90 (s) | Cv (mm ² /s) | RELACION VACIOS e' | t90 (s) | Cv (mm ² /s) | RELACION VACIOS e' | t90 (s) | Cv (mm ² /s) | RELACION VACIOS e' | t90 (s) | Cv (mm ² /s) | RELACION VACIOS e' | t90 (s) | Cv (mm ² /s) |
| 1.236 | 27.04 | 2.768 | 0.946 | 6.25 | 13.332 | 0.934 | 5.76 | 13.611 | 0.877 | 3.06 | 25.777 | 0.857 | 4.00 | 19.028 |
| 0.965 | 22.09 | 2.890 | 0.912 | 13.69 | 5.743 | 0.901 | 7.84 | 9.498 | 0.810 | 6.76 | 10.476 | 0.728 | 16.00 | 3.998 |
| 0.914 | 11.56 | 5.185 | 0.835 | 28.09 | 2.554 | 0.837 | 11.56 | 5.938 | 0.634 | 30.25 | 1.877 | 0.533 | 100.00 | 0.553 |
| 0.845 | 7.29 | 7.570 | 0.744 | 64.00 | 1.005 | 0.751 | 72.25 | 0.854 | 0.592 | 81.00 | 0.553 | 0.601 | 121.00 | 0.473 |
| 0.762 | 5.75 | 8.639 | 0.646 | 102.01 | 0.559 | 0.652 | 96.04 | 0.569 | 0.677 | 1836.00 | 0.030 | 0.632 | 0.00 | - |
| 0.663 | 13.69 | 3.528 | 0.546 | 81.00 | 0.676 | 0.550 | 134.56 | 0.393 | 0.772 | - | - | 0.782 | - | - |
| 0.711 | 31.56 | 1.633 | 0.582 | 225.00 | 0.257 | 0.601 | 121.00 | 0.473 | 0.771 | - | - | 0.771 | - | - |
| 0.764 | 1936.00 | 0.030 | 0.632 | - | - | 0.677 | 0.00 | - | 0.771 | - | - | 0.771 | - | - |
| 0.923 | | | 0.772 | | | 0.782 | | | 0.771 | | | 0.771 | | |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

TABLA 4. 8. RESUMEN ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN DE MUESTRA M4 0%, 10%, 20% Y 30%

| ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN - MUESTRA M4-0%,10%,20%,30% | | | | | | | | | | | | |
|---|----------------------------|-----------------------------|--------------------|---------|-----------------------------|--------------------|---------|-----------------------------|--------------------|----------------|-----------------------------|--|
| ASTM D2435 | | | | | | | | | | | | |
| MUESTRA | | M4-0% | M4-10% | M4-20% | M4-30% | | | | | | | |
| | DIÁMETRO (mm) | 65.00 | 50.00 | 50.00 | 50.00 | | | | | | | |
| | ÁREA (cm ²) | 33.18 | 19.63 | 19.63 | 19.63 | | | | | | | |
| | ALTURA (mm) | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | | | | | | | |
| | VOLUMEN (cm ³) | 66.37 | 39.27 | 39.27 | 39.27 | | | | | | | |
| | Gs | 2.747 | 2.624 | 2.602 | 2.583 | | | | | | | |
| | eo | 1.158 | 0.762 | 0.752 | 0.712 | | | | | | | |
| | T90 | 0.848 | 0.848 | 0.848 | 0.848 | | | | | | | |
| | yh (g/cm ³) | 1.719 | 1.826 | 1.861 | 1.797 | | | | | | | |
| | ys (g/cm ³) | 1.27 | 1.49 | 1.48 | 1.51 | | | | | | | |
| | wo (%) | 35.03 | 22.608 | 25.386 | 19.099 | | | | | | | |
| | wf (%) | 50.18 | 37.699 | 32.209 | 27.776 | | | | | | | |
| | Hs (mm) | 9.27 | 11.35 | 11.41 | 11.68 | | | | | | | |
| | Hv (mm) | 10.73 | 8.649 | 8.587 | 8.317 | | | | | | | |
| | Vs (cm ³) | 30.76 | 22.29 | 22.41 | 22.94 | | | | | | | |
| | Vv (cm ³) | 35.61 | 16.98 | 16.86 | 16.33 | | | | | | | |
| | | MUESTRA M4-10% | | | | MUESTRA M4-20% | | | | MUESTRA M4-30% | | |
| RELACIÓN VACÍOS e' | t90 (s) | Cv t90 (mm ² /s) | RELACIÓN VACÍOS e' | t90 (s) | Cv t90 (mm ² /s) | RELACIÓN VACÍOS e' | t90 (s) | Cv t90 (mm ² /s) | RELACIÓN VACÍOS e' | t90 (s) | Cv t90 (mm ² /s) | |
| 1.158 | 8.41 | 9.587 | 0.762 | 4.00 | 19.492 | 0.752 | 8.41 | 9.305 | 0.712 | 2.56 | 32.648 | |
| 1.050 | 9.00 | 8.300 | 0.617 | 16.00 | 4.296 | 0.615 | 15.21 | 4.574 | 0.687 | 9.00 | 9.023 | |
| 1.000 | 8.41 | 8.315 | 0.556 | 9.00 | 7.004 | 0.560 | 6.25 | 10.347 | 0.663 | 5.29 | 14.748 | |
| 0.919 | 27.04 | 2.349 | 0.483 | 6.25 | 9.103 | 0.501 | 15.21 | 3.927 | 0.621 | 5.76 | 12.841 | |
| 0.816 | 10.24 | 5.512 | 0.404 | 125.44 | 0.405 | 0.441 | 30.25 | 1.810 | 0.577 | 73.96 | 0.944 | |
| 0.705 | 46.24 | 1.185 | 0.322 | 33.06 | 1.484 | 0.376 | 10.89 | 4.888 | 0.529 | 16.00 | 4.295 | |
| 0.764 | 600.25 | 0.098 | 0.358 | 351.56 | 0.149 | 0.401 | 127.69 | 0.437 | 0.553 | 96.04 | 0.741 | |
| 0.837 | 3906.25 | 0.019 | 0.415 | 0.00 | - | 0.443 | 0.00 | - | 0.583 | 0.00 | - | |
| 1.153 | | | 0.529 | | | 0.577 | | | 0.655 | | | |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

TABLA 4. 9. RESUMEN ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN DE MUESTRA M5 0%, 10%, 20% Y 30%

| ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN - MUESTRA M5-0%10%20%30% | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---------------|-----------------------------|-------------|----------------------------|--------|-------|--------|-------------------------|-------------------------|--------|--------|---------|---------|-----------------------|-----------------------|
| ASTM D2435 | | | | | | | | | | | | | | | |
| MUESTRA | M5-0% | | M5-10% | | M5-20% | | M5-30% | | | | | | | | |
| | DIÁMETRO (mm) | ÁREA (cm ²) | ALTURA (mm) | VOLUMEN (cm ³) | Gs | eo | T90 | yh (g/cm ³) | ys (g/cm ³) | wo (%) | wf (%) | Hs (mm) | Hv (mm) | Vs (cm ³) | Vv (cm ³) |
| | 50.00 | 19.63 | 20.00 | 39.27 | 2.784 | 1.245 | 0.848 | 1.664 | 1.24 | 34.189 | 41.848 | 8.91 | 11.091 | 17.49 | 21.78 |
| | 50.00 | 19.63 | 20.00 | 39.27 | 2.623 | 0.823 | 0.848 | 1.717 | 1.44 | 19.306 | 23.890 | 10.97 | 9.027 | 21.55 | 17.72 |
| | 50.00 | 19.63 | 20.00 | 39.27 | 2.581 | 0.794 | 0.848 | 1.797 | 1.44 | 24.863 | 29.411 | 11.15 | 8.851 | 21.89 | 17.38 |
| | 50.00 | 19.63 | 20.00 | 39.27 | 2.553 | 0.732 | 0.848 | 1.760 | 1.47 | 19.437 | 26.071 | 11.55 | 8.454 | 22.67 | 16.60 |
| MUESTRA M5-0% | | | | | | | | | | | | | | | |
| RELACIÓN VACIOS e' | t90 (s) | Cv t90 (mm ² /s) | | | | | | | | | | | | | |
| 1.245 | 7.84 | 10.275 | | | | | | | | | | | | | |
| 1.131 | 4.00 | 18.536 | | | | | | | | | | | | | |
| 1.067 | 6.25 | 10.878 | | | | | | | | | | | | | |
| 0.953 | 9.61 | 6.330 | | | | | | | | | | | | | |
| 0.85 | 146.41 | 0.373 | | | | | | | | | | | | | |
| 0.753 | 14.44 | 3.698 | | | | | | | | | | | | | |
| 0.809 | 784.00 | 0.073 | | | | | | | | | | | | | |
| 0.879 | 0.00 | 0.000 | | | | | | | | | | | | | |
| 1.073 | 0.00 | 0.000 | | | | | | | | | | | | | |
| MUESTRA M5-10% | | | | | | | | | | | | | | | |
| RELACIÓN VACIOS e' | t90 (s) | Cv t90 (mm ² /s) | | | | | | | | | | | | | |
| 0.823 | 2.25 | 36.732 | | | | | | | | | | | | | |
| 0.776 | 4.00 | 19.736 | | | | | | | | | | | | | |
| 0.741 | 4.00 | 18.854 | | | | | | | | | | | | | |
| 0.697 | 8.41 | 8.494 | | | | | | | | | | | | | |
| 0.649 | 31.36 | 2.132 | | | | | | | | | | | | | |
| 0.588 | 47.61 | 1.375 | | | | | | | | | | | | | |
| 0.616 | 196.00 | 0.348 | | | | | | | | | | | | | |
| 0.652 | 0.00 | - | | | | | | | | | | | | | |
| 0.731 | 0.00 | - | | | | | | | | | | | | | |
| MUESTRA M5-20% | | | | | | | | | | | | | | | |
| RELACIÓN VACIOS e' | t90 (s) | Cv t90 (mm ² /s) | | | | | | | | | | | | | |
| 0.794 | 1.69 | 49.207 | | | | | | | | | | | | | |
| 0.759 | 4.00 | 20.003 | | | | | | | | | | | | | |
| 0.726 | 4.41 | 17.432 | | | | | | | | | | | | | |
| 0.690 | 6.25 | 11.730 | | | | | | | | | | | | | |
| 0.646 | 43.56 | 1.579 | | | | | | | | | | | | | |
| 0.585 | 40.96 | 1.637 | | | | | | | | | | | | | |
| 0.606 | 96.04 | 0.720 | | | | | | | | | | | | | |
| 0.634 | 0.00 | - | | | | | | | | | | | | | |
| 0.701 | 0.00 | - | | | | | | | | | | | | | |
| MUESTRA M5-30% | | | | | | | | | | | | | | | |
| RELACIÓN VACIOS e' | t90 (s) | Cv t90 (mm ² /s) | | | | | | | | | | | | | |
| 0.732 | 1.96 | 42.663 | | | | | | | | | | | | | |
| 0.708 | 2.89 | 28.003 | | | | | | | | | | | | | |
| 0.676 | 1.96 | 39.526 | | | | | | | | | | | | | |
| 0.635 | 5.76 | 12.774 | | | | | | | | | | | | | |
| 0.592 | 12.25 | 5.672 | | | | | | | | | | | | | |
| 0.544 | 8.41 | 8.098 | | | | | | | | | | | | | |
| 0.561 | 25.00 | 2.796 | | | | | | | | | | | | | |
| 0.584 | 0.00 | - | | | | | | | | | | | | | |
| 0.663 | 0.00 | - | | | | | | | | | | | | | |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

4.1.8 CORTE DIRECTO

El resumen de resultados de los ensayos de corte directo de las muestras naturales y las muestras dosificadas se detalla en la Tabla 4.10.

En la tabla se puede apreciar un aumento significativo del valor del ángulo de fricción interna de las muestras de suelo, conforme aumenta el porcentaje de reemplazo con puzolana de ceniza de cascarilla de arroz y puzolana de ceniza volcánica. Estos resultados demuestran que el uso de puzolanas aumenta la resistencia al corte en las arcillas, lo que puede ser una importante característica de mejoramiento y estabilización si se desea mejorar propiedades mecánicas como la resistencia al deslizamiento.

TABLA 4. 10. RESUMEN ENSAYO DE CORTE DIRECTO DE MUESTRAS NATURALES Y MUESTRAS ESTABILIZADAS.

| CORTE DIRECTO | | | | |
|---------------|-----------|------------|-------------------------|---------------------------|
| ASTM D3080 | | | | |
| MUESTRA | REEMPLAZO | ϕ (°) | c (kg/cm ²) | % VARIACIÓN ϕ (°) |
| M3 | 0% | 30.96 | 0.230 | 0.0% |
| | 10% | 41.67 | 1.027 | 34.6% |
| | 20% | 50.43 | 0.900 | 62.9% |
| | 30% | 51.34 | 0.870 | 65.8% |
| M4 | 0% | 18.26 | 0.300 | 0.0% |
| | 10% | 46.12 | 1.240 | 152.6% |
| | 20% | 50.89 | 0.975 | 178.7% |
| | 30% | 54.65 | 0.945 | 199.3% |
| M5 | 0% | 18.26 | 0.510 | 0.0% |
| | 10% | 31.80 | 0.950 | 74.2% |
| | 20% | 36.87 | 1.310 | 101.9% |
| | 30% | 45.00 | 1.340 | 146.4% |

Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

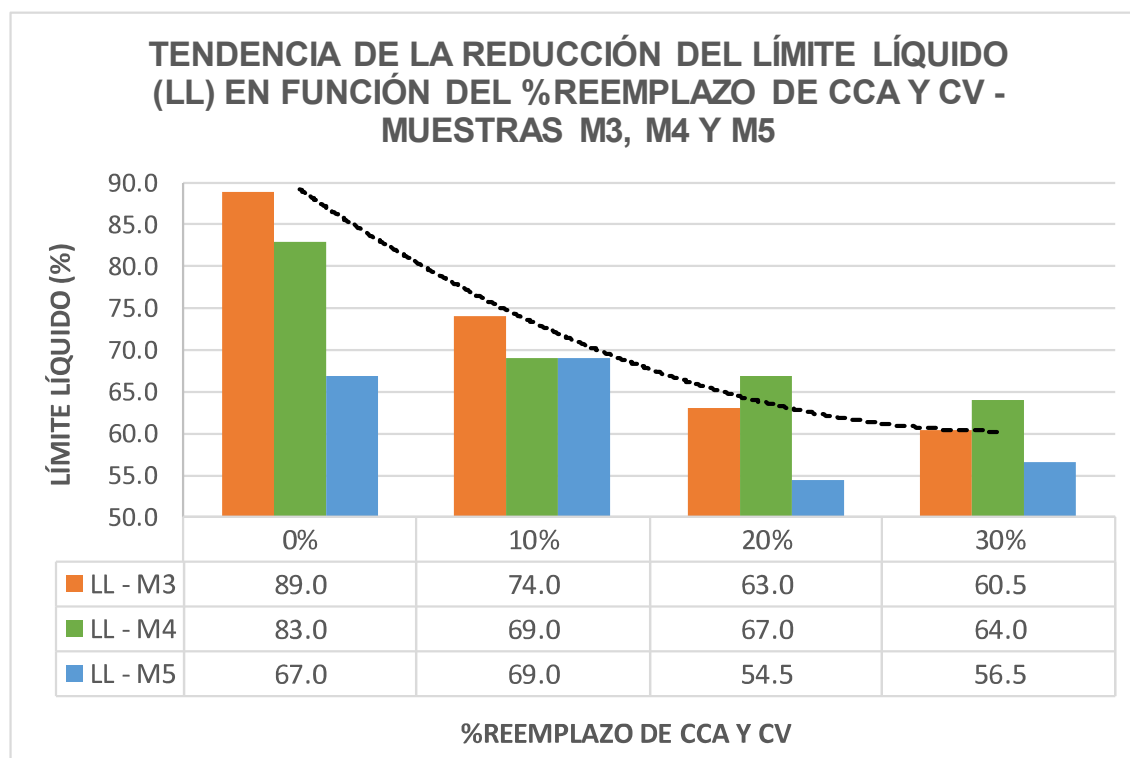
4.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE MUESTRAS NATURALES Y MUESTRAS ESTABILIZADAS PARA DIFERENTES PORCENTAJES DE REEMPLAZO

4.2.1 LIMITE LÍQUIDO

En el Gráfico 4.1 se puede observar que existe una tendencia decreciente en el límite líquido.

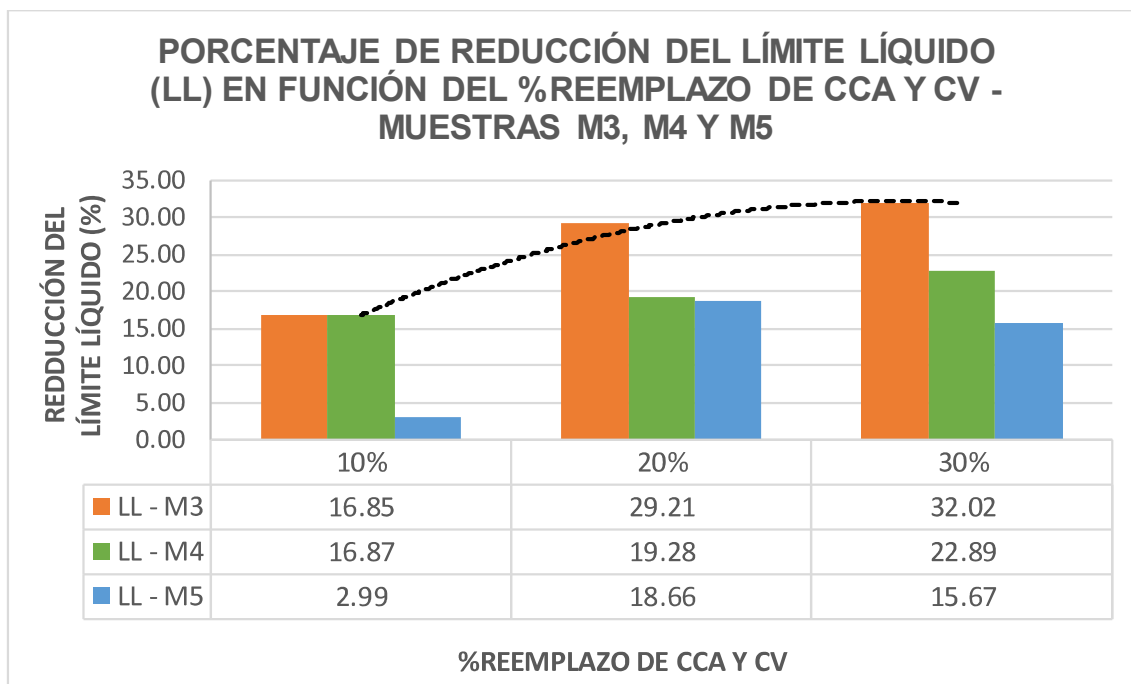
Prácticamente en todas las muestras dosificadas, el uso de las puzolanas reduce el valor de límite líquido, respecto al valor de dicho parámetro en las muestras naturales. Es decir que, para obtener el límite líquido en suelos estabilizados con puzolanas provenientes de la ceniza de cascarilla de arroz y ceniza volcánica, se necesita menor cantidad de agua.

GRÁFICO 4. 1. TENDENCIA DE LA DISMINUCIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO (LL) EN FUNCIÓN DEL %REEMPLAZO DE CCA Y CV - MUESTRA M3.



Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

GRÁFICO 4. 2. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO (LL) EN FUNCIÓN DEL % REEMPLAZO DE CCA Y CV - MUESTRAS M3, M4 Y M5



Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

Analizando el Gráfico 4.2, que muestra el porcentaje de reducción del límite líquido que existe entre la muestra natural y la respectiva dosificación, se tiene que:

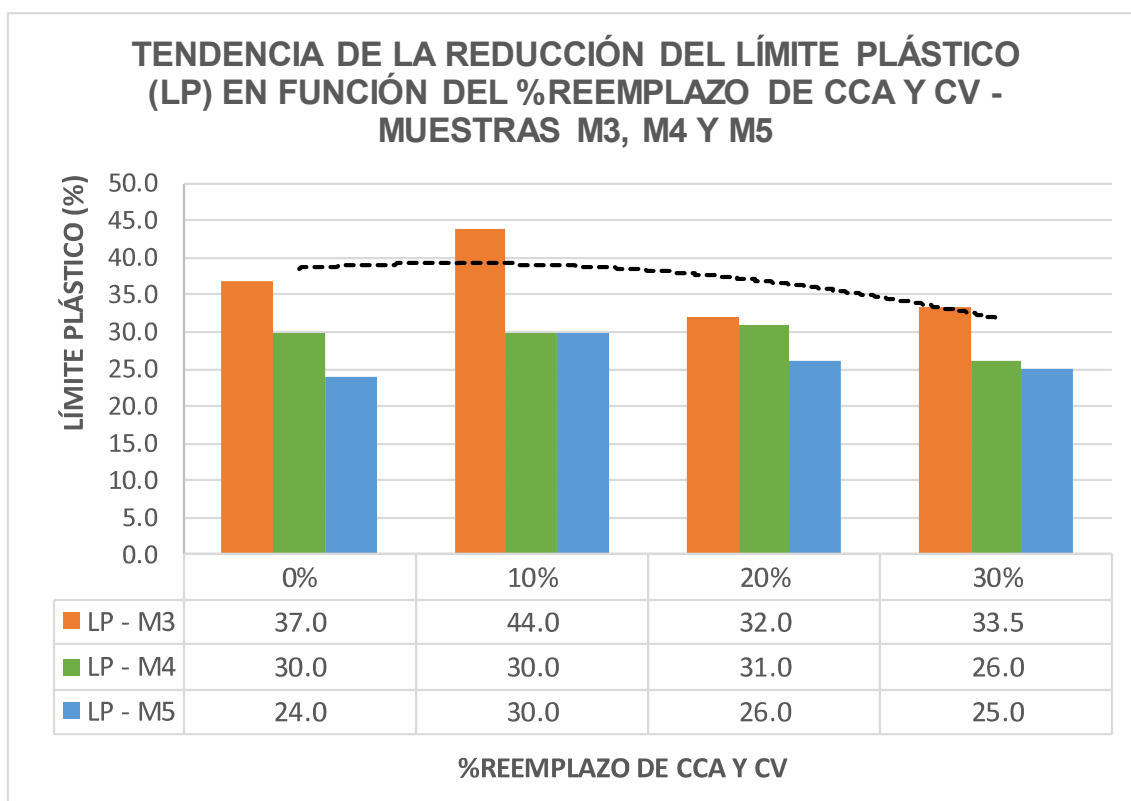
Al momento de realizar el reemplazo del 10% de porcentaje en peso de puzolana de ceniza de cascarilla de arroz y la puzolana de ceniza volcánica, el porcentaje de reducción del límite líquido estuvo entre un 3% hasta aproximadamente un 17% de reducción. Mientras que, en el caso del reemplazo del 20% de estas puzolanas, la reducción del límite líquido estuvo entre un 19% hasta casi un 30% de reducción. Finalmente, con el reemplazo del 30% de estas puzolanas, la reducción del límite líquido estuvo entre un 16% hasta aproximadamente un 32%.

4.2.2 LÍMITE PLÁSTICO

En el Gráfico 4.3 se puede observar que existe una tendencia bajista en lo que al límite plástico se refiere.

Prácticamente en todas las muestras dosificadas, el uso de las puzolanas reduce el valor de límite plástico. Es decir, las arcillas reducen su comportamiento plástico

GRÁFICO 4. 3. TENDENCIA DE LA VARIACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO (LP) EN FUNCIÓN DEL %REEMPLAZO DE CCA Y CV - MUESTRA M3, M4 Y M5.



Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

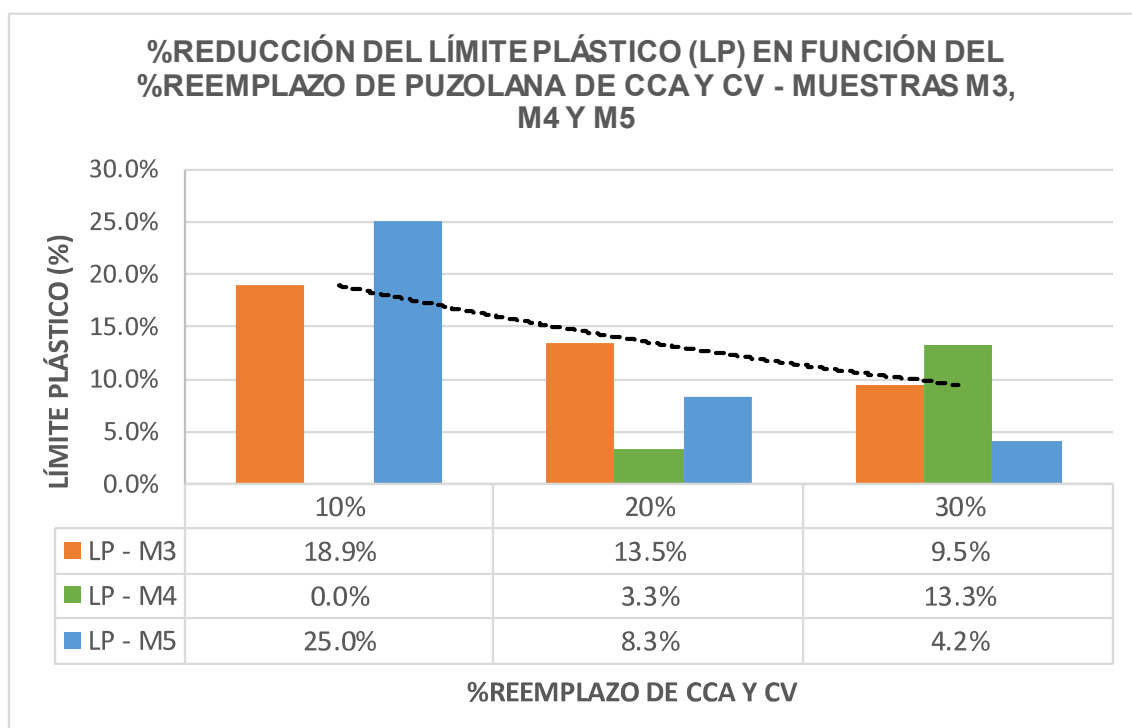
Analizando el Gráfico 4.4, que indica el porcentaje de reducción del límite plástico que existe entre la muestra natural y la respectiva dosificación de puzolanas, se tiene que:

Al momento de realizar el reemplazo del 10% de porcentaje en peso de puzolana de ceniza de cascarilla de arroz y la puzolana de ceniza volcánica, el porcentaje de reducción del límite plástico estuvo entre un 0% hasta aproximadamente un 25%, lo que indica un poco de incertidumbre respecto a un rango más definido de reducción.

Mientras que, en el caso del reemplazo del 20% de estas puzolanas, la reducción del límite plástico es más clara, ya que éste estuvo entre un 3% hasta un 13.5%.

Finalmente, con el reemplazo del 30% de estas puzolanas, la reducción del límite plástico estuvo entre un 4% hasta un poco más del 13%, rango de reducción que se asemeja al del 20% de reemplazo de puzolanas.

GRÁFICO 4. 4. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO (LP) EN FUNCIÓN DEL %REEMPLAZO DE CCA Y CV - MUESTRAS M3, M4 Y M5.



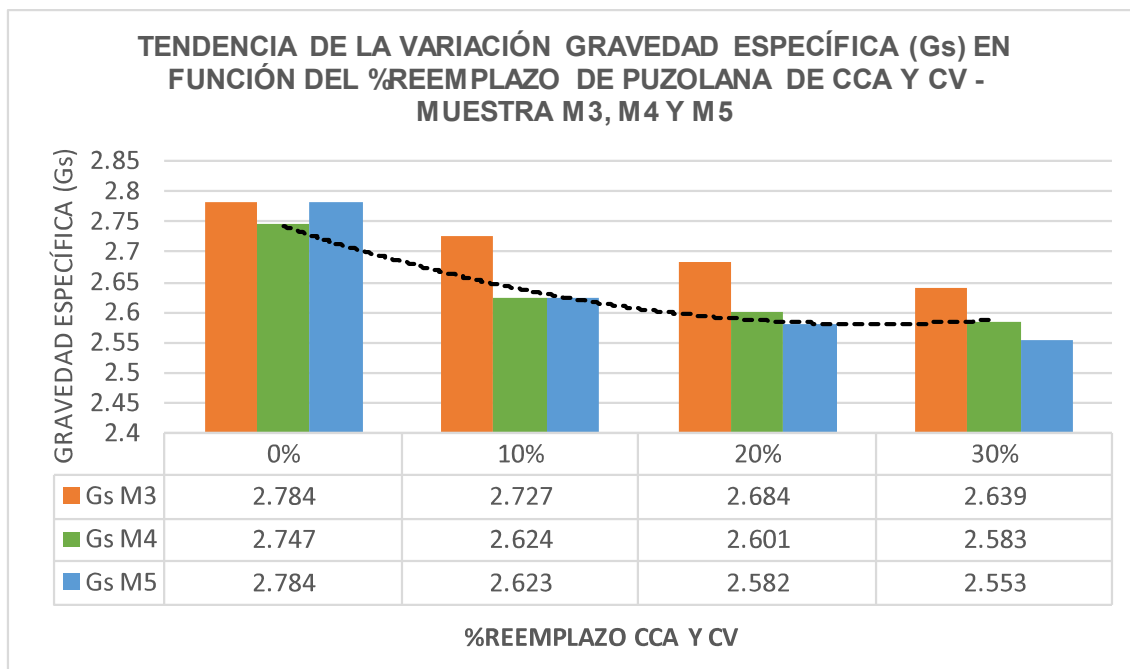
Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

4.2.3 GRAVEDAD ESPECÍFICA

En el Gráfico 4.5 se puede observar cómo los valores de gravedad específica varían cuando se aumenta el porcentaje de reemplazo de las puzolanas de ceniza de cascarilla de arroz y ceniza volcánica.

En absolutamente todas las muestras dosificadas, el uso de las puzolanas reduce el valor de la gravedad específica. Es decir, las arcillas reducen su peso por unidad de volumen al usar estos materiales.

GRÁFICO 4. 5. TENDENCIA DE LA VARIACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA (Gs) EN FUNCIÓN DEL %REEMPLAZO DE PUZOLANA CCA Y CV - MUESTRA M3, M4 Y M5.



Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

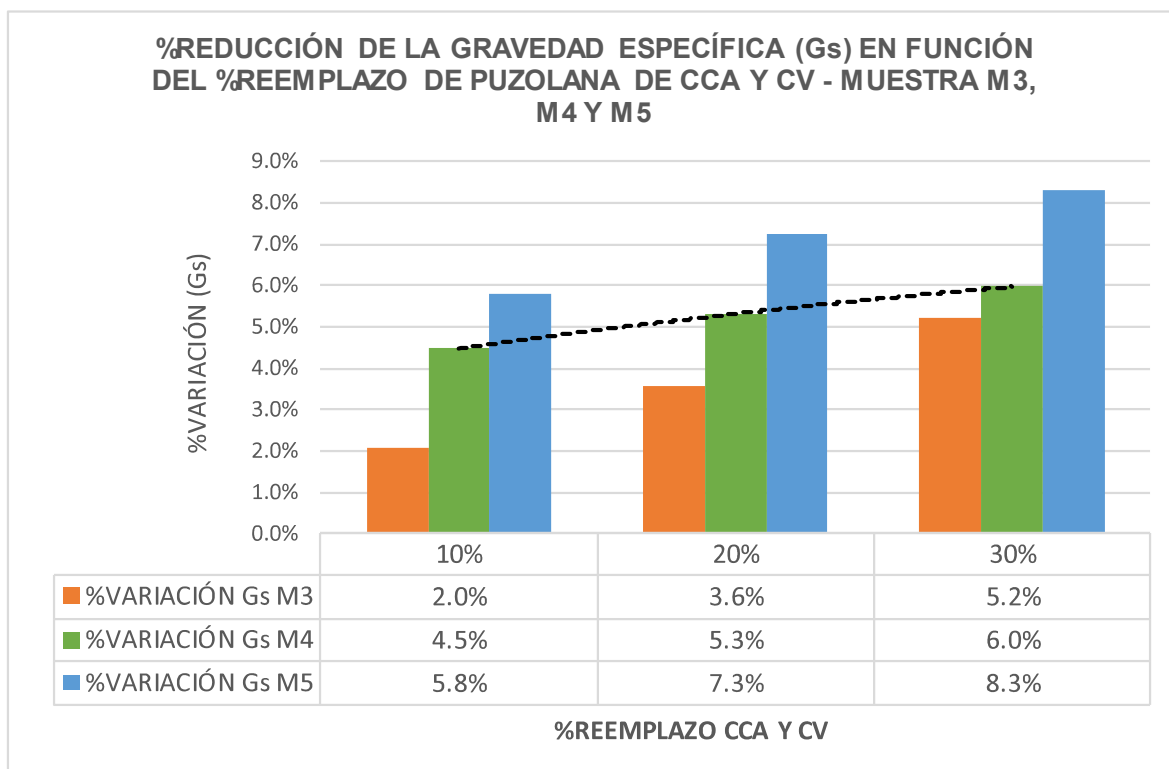
Analizando el Gráfico 4.6, que indica el porcentaje de reducción de la gravedad específica que existe entre la muestra natural y la respectiva dosificación de puzolanas, se tiene que:

Al momento de realizar el reemplazo del 10% de porcentaje en peso de puzolana de ceniza de cascarilla de arroz y la puzolana de ceniza volcánica, el porcentaje de reducción del valor de la gravedad específica estuvo entre un 2% hasta aproximadamente un 6% de reducción.

Mientras que, en el caso del reemplazo del 20% de estas puzolanas, la reducción del valor de la gravedad específica estuvo entre un 3.5% un poco más del 7%.

Finalmente, con el reemplazo del 30% de estas puzolanas, la reducción del valor de la gravedad específica estuvo entre un 5% hasta un poco más del 8%, lo que convierte a esta dosificación en la que mejor reduce el valor de gravedad específica.

GRÁFICO 4. 6. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA (Gs) EN FUNCIÓN DEL %REEMPLAZO DE PUZOLANA CCA Y CV - MUESTRA M3, M4 Y M5.



Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

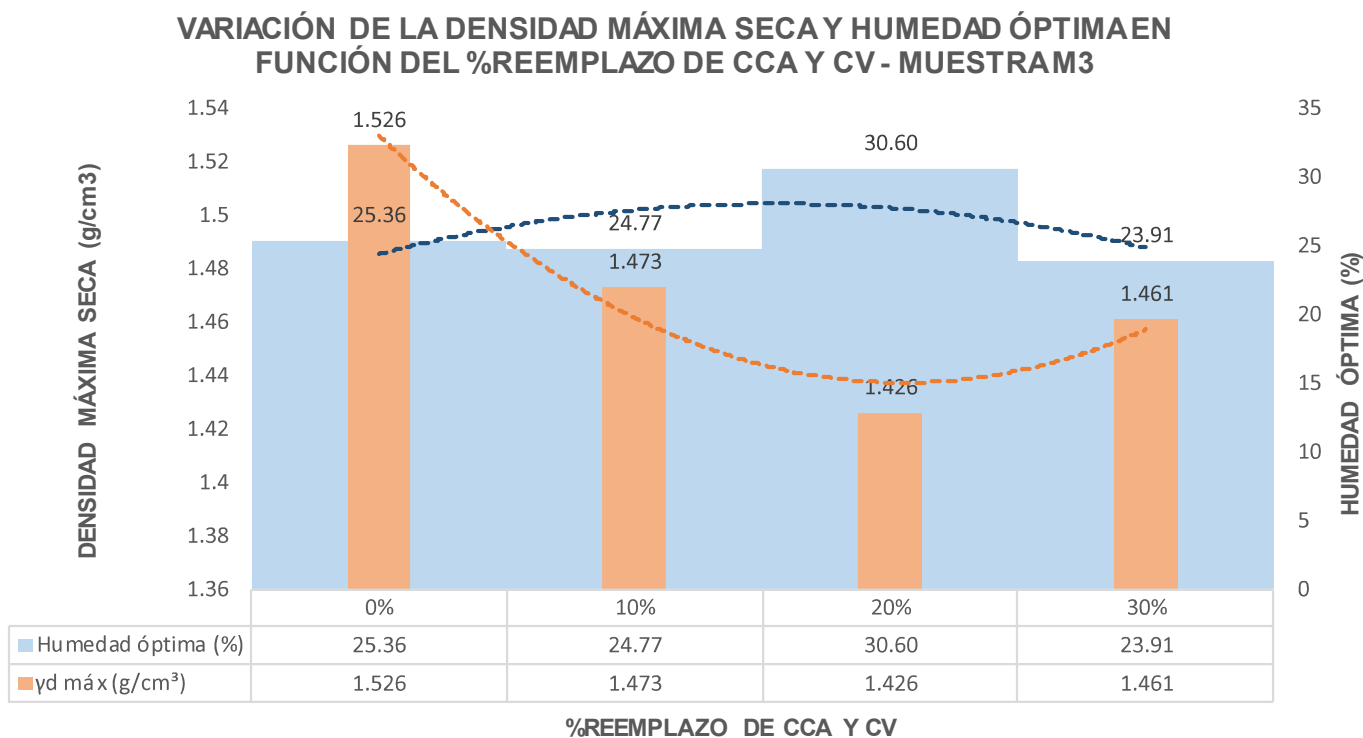
4.2.4 COMPACTACIÓN PRÓTOR MODIFICADO

En los Gráficos 4.7, 4.8 y 4.9, se puede observar cómo los valores de densidad máxima seca y humedad óptima varían cuando se aumenta el porcentaje de reemplazo de las puzolanas de ceniza de cascarilla de arroz y ceniza volcánica.

Prácticamente en todas las muestras dosificadas, el uso de las puzolanas reduce el valor de la densidad máxima seca hasta cuando existe un 20% de reemplazo.

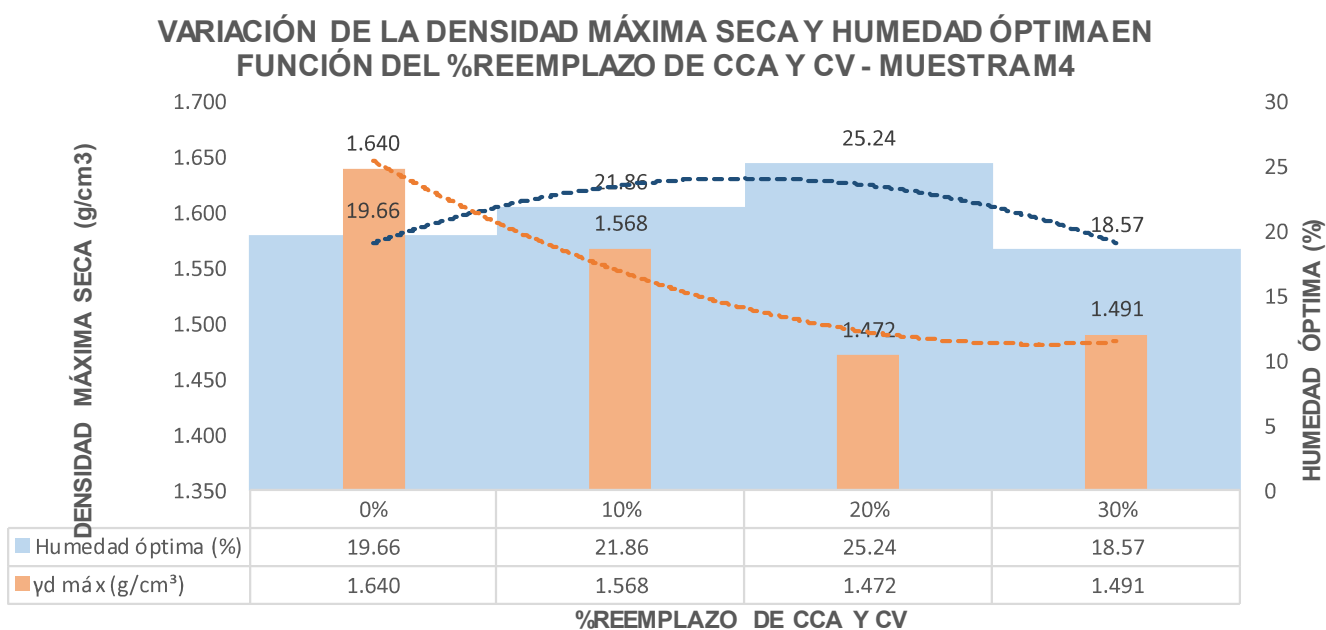
Es decir, cuando el valor de porcentaje de reemplazo de las puzolanas de ceniza de cascarilla de arroz y puzolana de ceniza volcánica es mayor al 20%, el valor de la densidad máxima seca vuelve a ascender, como se puede ver en los Gráficos 4.7, 4.8 y 4.9.

GRÁFICO 4. 7. VARIACIÓN DE LA DENSIDAD MÁXIMA SECA Y HUMEDAD ÓPTIMA EN FUNCIÓN DEL %REEMPLAZO DE CCA Y CV - MUESTRA M3



Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

GRÁFICO 4. 8. VARIACIÓN DE LA DENSIDAD MÁXIMA SECA Y HUMEDAD ÓPTIMA EN FUNCIÓN DEL %REEMPLAZO DE CCA Y CV - MUESTRA M4.



Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

GRÁFICO 4. 9. VARIACIÓN DE LA DENSIDAD MÁXIMA SECA Y HUMEDAD ÓPTIMA EN FUNCIÓN DEL % REEMPLAZO DE CCA Y CV - MUESTRA M5.

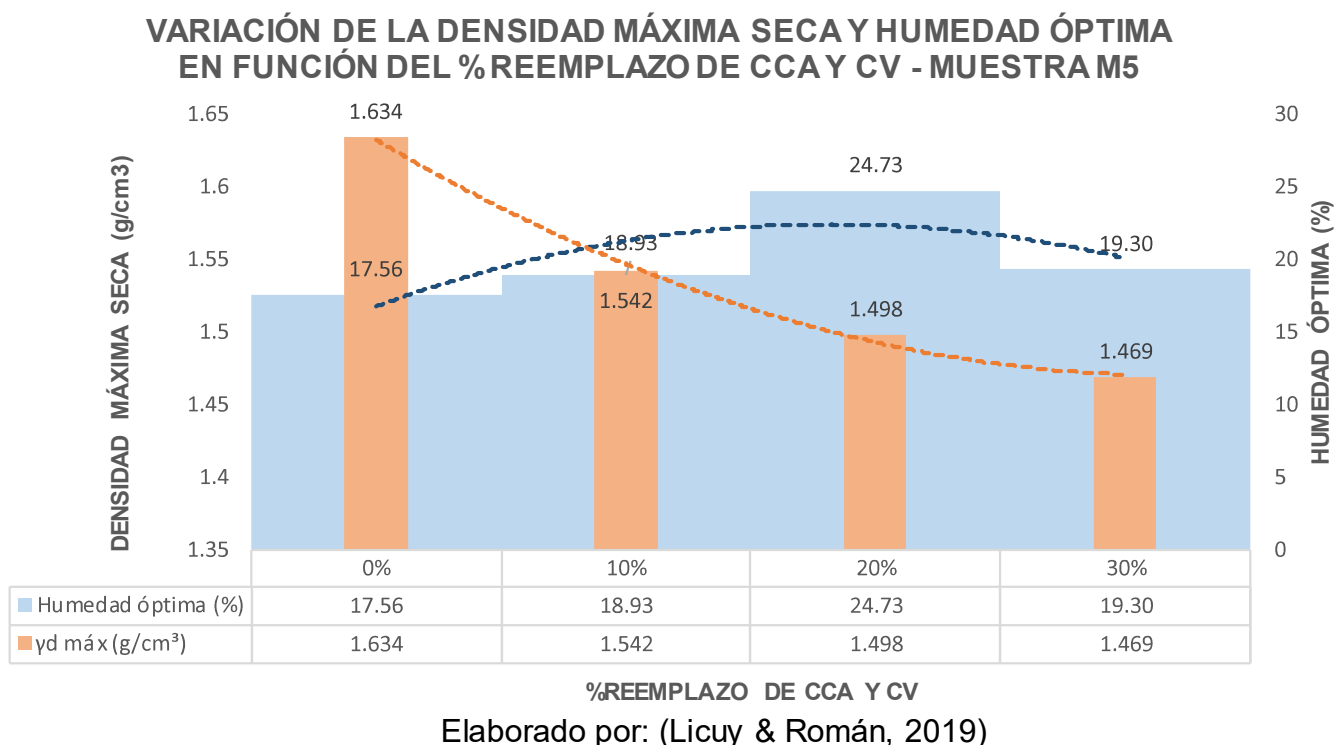
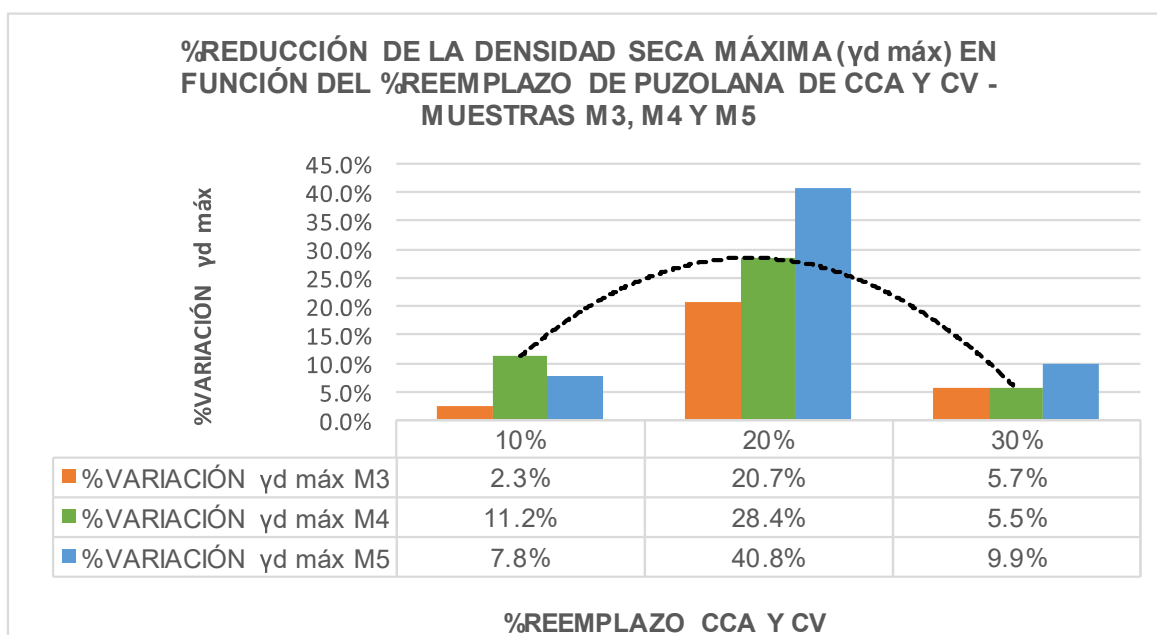


GRÁFICO 4. 10. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE LA DENSIDAD SECA MÁXIMA (γ_d máx) EN FUNCIÓN DEL % REEMPLAZO DE PUZOLANA DE CCA Y CV - MUESTRAS M3, M4 Y M5



Con respecto al porcentaje de reducción, se observa en el Gráfico 4.10 que cuando se realiza un reemplazo del 20% de puzolanas de ceniza de cascarilla de arroz y ceniza volcánica en arcillas expansivas, el mayor porcentaje de reducción de la densidad máxima seca ocurre en este caso.

Cuando se realizó el reemplazo del 10% de porcentaje en peso de puzolana de ceniza de cascarilla de arroz y la puzolana de ceniza volcánica, el porcentaje de reducción del valor de densidad seca máxima estuvo entre un 2% hasta un poco más del 11%.

Como se anotó anteriormente, en el caso del reemplazo del 20% de estas puzolanas, la reducción del valor de la densidad seca máxima es más clara, ya que éste estuvo entre un aproximadamente un 20% hasta casi un 41%.

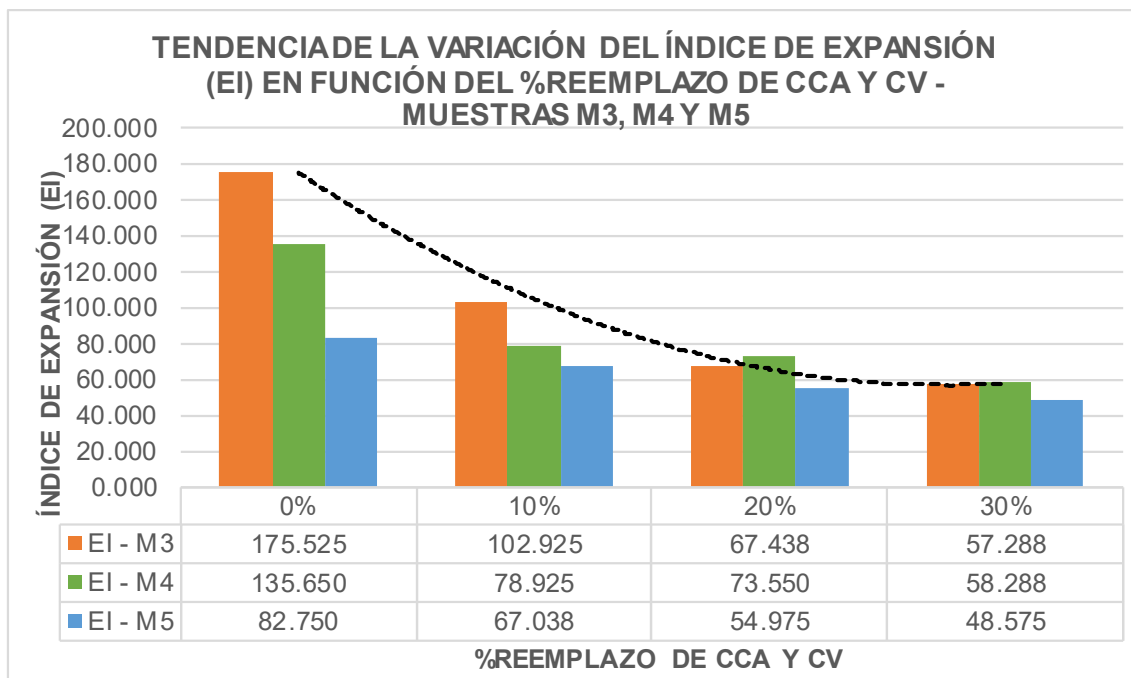
Finalmente, con el reemplazo del 30% de estas puzolanas, la reducción del valor de la densidad seca máxima estuvo entre un 6% hasta un 10%.

4.2.5 ÍNDICE DE EXPANSIÓN

En el Gráfico 4.11, se puede observar una reducción del valor del índice de expansión en las diferentes muestras a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo de puzolanas.

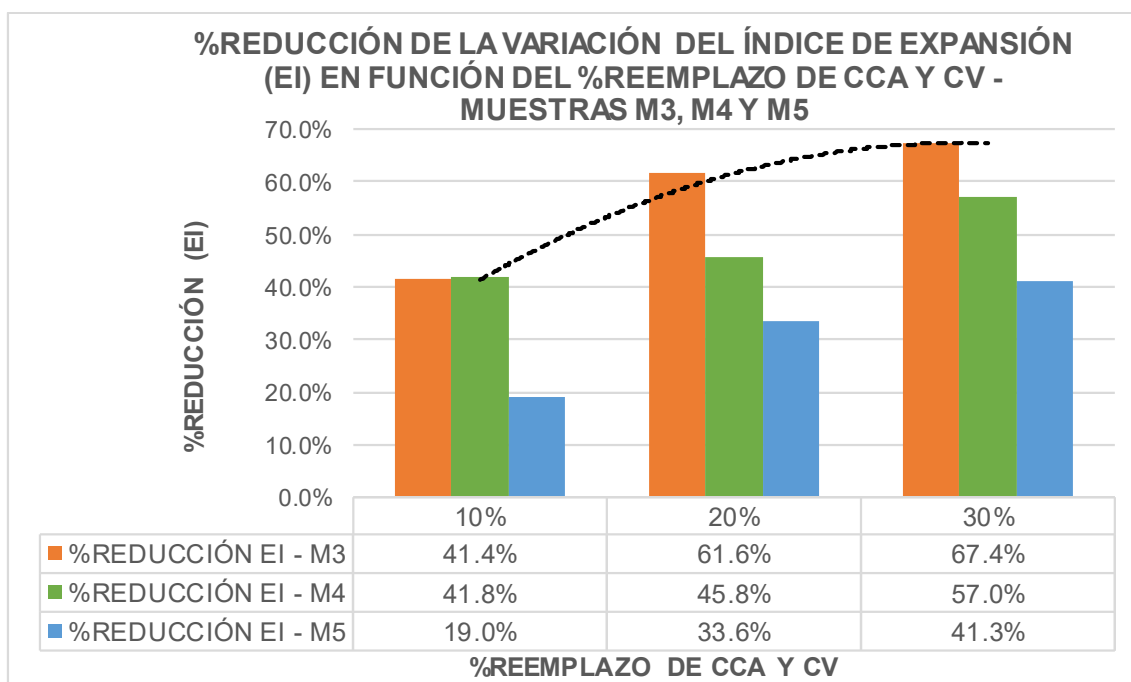
Es importante analizar que, si bien el índice de expansión se reduce a medida que el porcentaje de reemplazo de puzolanas aumenta, este efecto tiene un límite, que podemos ver en el Gráfico 4.11 en donde entre el 20% y el 30% de reemplazo la pendiente de la línea de tendencia cambia y evidencian que a partir de este punto no existe buenos resultados de reducción de comportamiento expansivo en este tipo de arcillas. Es decir que, para controlar este fenómeno, se puede permitir reemplazar máximo hasta por un 30% de este tipo de puzolanas. Como se mencionó anteriormente, este parámetro es muy importante para determinar si el uso de estas puzolanas funciona como un método efectivo de estabilización. Y con base en lo analizado, se puede concluir que puede ser una gran alternativa para la estabilización de arcillas expansivas porque pueden reducir el potencial expansivo de las mismas.

GRÁFICO 4. 11. TENDENCIA DE LA VARIACIÓN DEL ÍNDICE DE EXPANSIÓN (EI) EN FUNCIÓN DEL %REEMPLAZO DE PUZOLANA DE CCA Y CV - MUESTRAS M3, M4 Y M5.



Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

GRÁFICO 4. 12. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE LA VARIACIÓN DEL ÍNDICE DE EXPANSIÓN (EI) EN FUNCIÓN DEL %REEMPLAZO DE CCA Y CV - MUESTRAS M3, M4 Y M5



Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

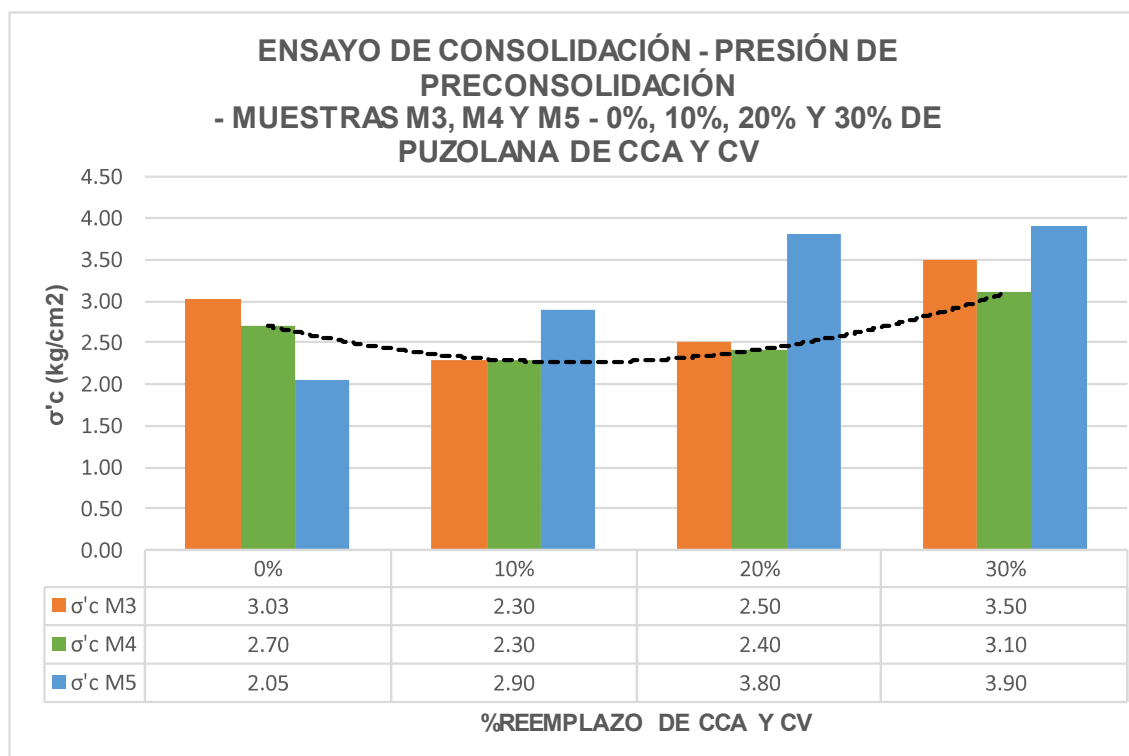
El Gráfico 4.12, muestra que en el reemplazo del 10% en peso de puzolana de ceniza de cascarilla de arroz y la puzolana de ceniza volcánica, el porcentaje de reducción del índice de expansión estuvo entre un 19% hasta 42%. Mientras que, en el caso del reemplazo del 20% de estas puzolanas, la reducción del valor del índice de expansión estuvo entre un aproximadamente un 34% hasta un 62%.

Finalmente, con el reemplazo del 30% de estas puzolanas, la reducción del índice de expansión estuvo entre un poco más del 41% hasta un poco más del 67%, rango que se puede conseguir utilizando el 20% de reemplazo de puzolanas, permitiendo definir a esta dosificación como la más eficaz si se analiza la cantidad de material que se necesita para estabilizar una arcilla expansiva.

4.2.6 CONSOLIDACIÓN

4.2.6.1 PRESIÓN DE PRECONSOLIDACIÓN

GRÁFICO 4. 13. TENDENCIA DE LA VARIACIÓN DE LA PRESIÓN DE PRECONSOLIDACIÓN EN FUNCIÓN DEL % REEMPLAZO DE PUZOLANA DE CCA Y CV - MUESTRAS M3, M4 Y M5.



Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

Con respecto a la presión de preconsolidación (Figura 4.13) se puede observar una tendencia muy clara en la que en los reemplazos de 10% y 20% este valor es menor con respecto a las muestras naturales y la dosificación de 30%.

4.2.6.2 COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN

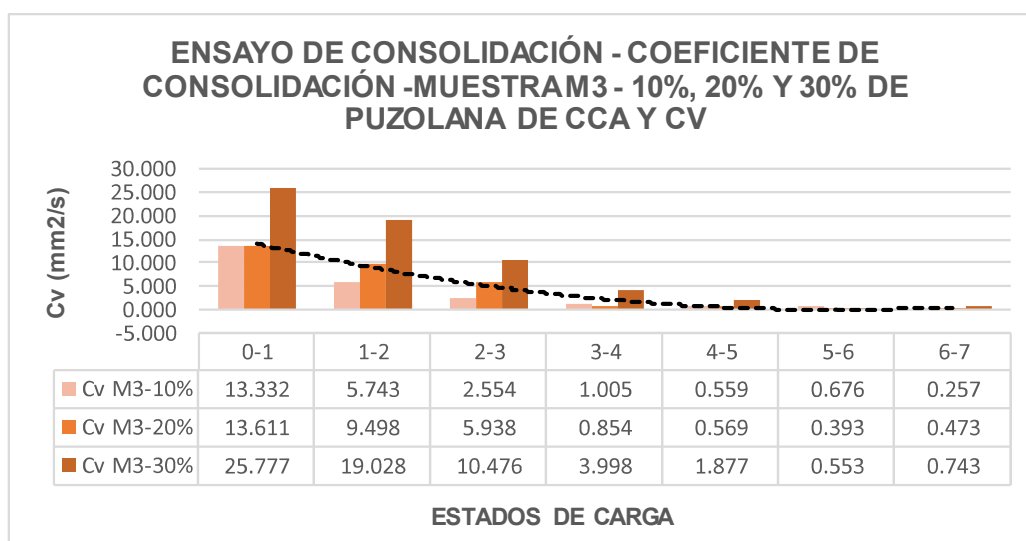
Las presiones utilizadas para los 8 estados de carga fueron:

TABLA 4. 11. ESTADOS DE CARGA PARA EL ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN.

| ESTADO DE CARGA | PRESIÓN (kg/cm ²) |
|-----------------|-------------------------------|
| 1 | 1 |
| 2 | 2 |
| 3 | 4 |
| 4 | 8 |
| 5 | 16 |
| 6 | 4 |
| 7 | 1 |
| 8 | 0 |

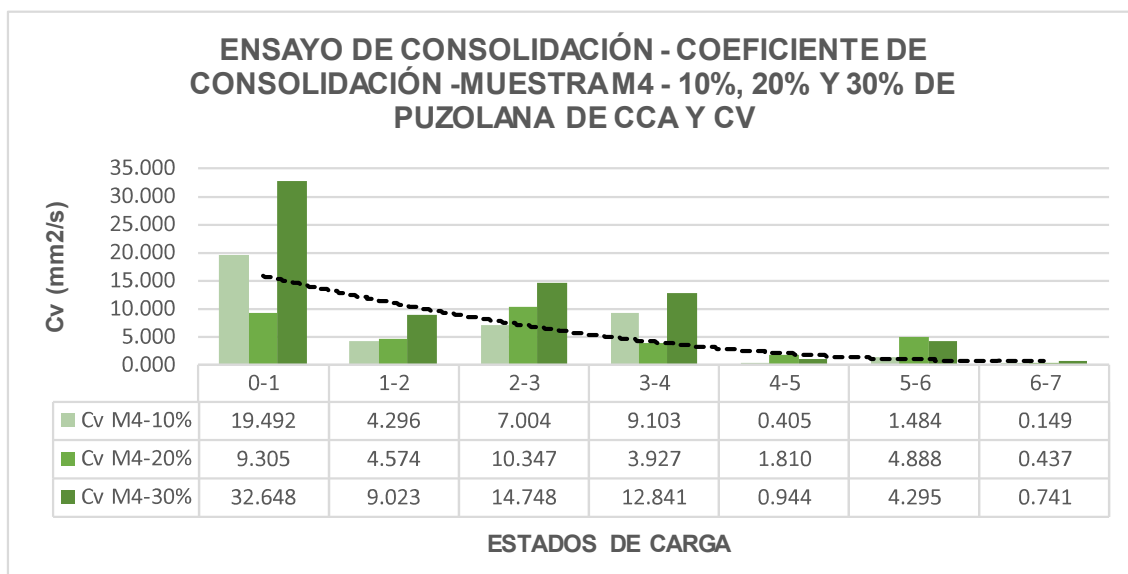
Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

GRÁFICO 4. 14. COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN - MUESTRA M3 CON 10%, 20% Y 30% DE PUZOLANA DE CCA Y CV.



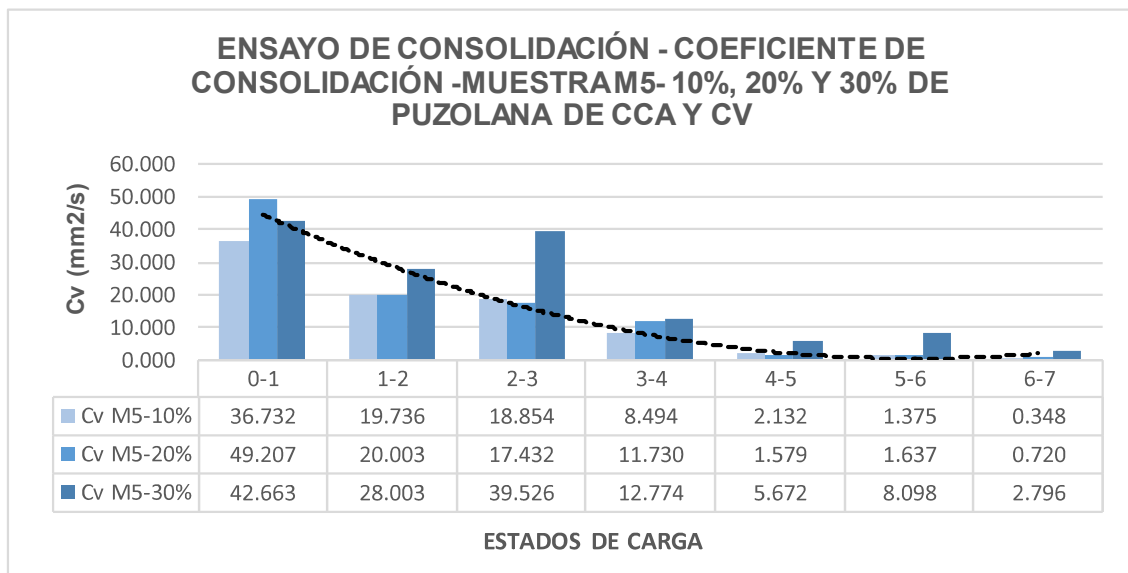
Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

GRÁFICO 4. 15. COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN - MUESTRA M4 - 10%, 20% Y 30% DE PUZOLANA DE CCA Y CV



Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

GRÁFICO 4. 16. COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN - MUESTRA M5 - 10%, 20% Y 30% DE PUZOLANA DE CCA Y CV



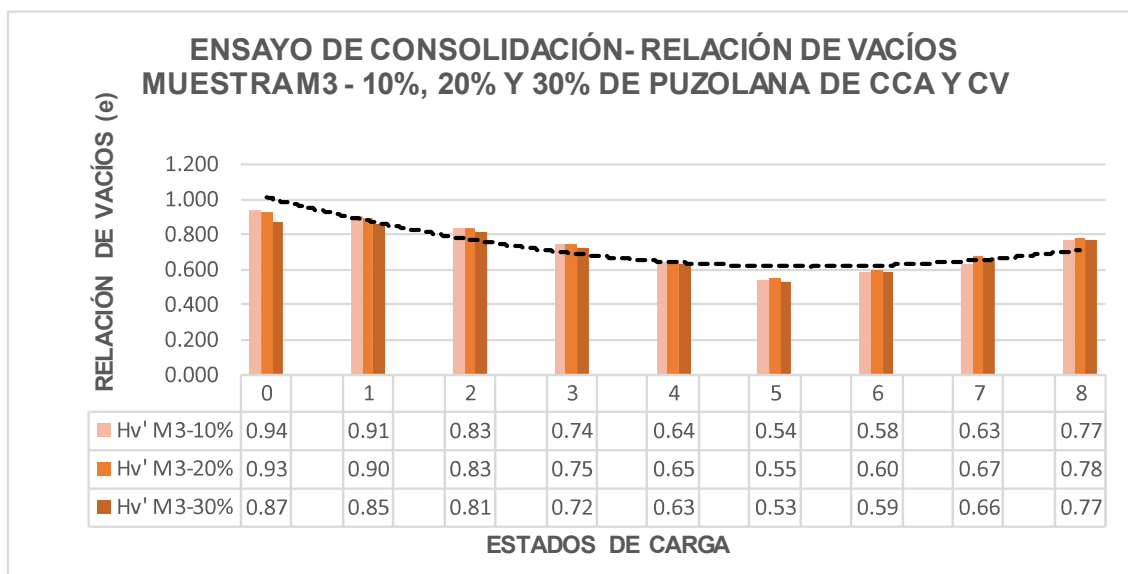
Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

Con respecto al coeficiente de consolidación se puede observar una tendencia muy clara de reducción en el último estado de carga (Gráfico 4.14, Gráfico 4.15 y Gráfico 4.16). Si se observa los valores de los estados de carga con mayor

presión se puede notar que el coeficiente de consolidación es menor con la dosificación del 20% de puzolanas.

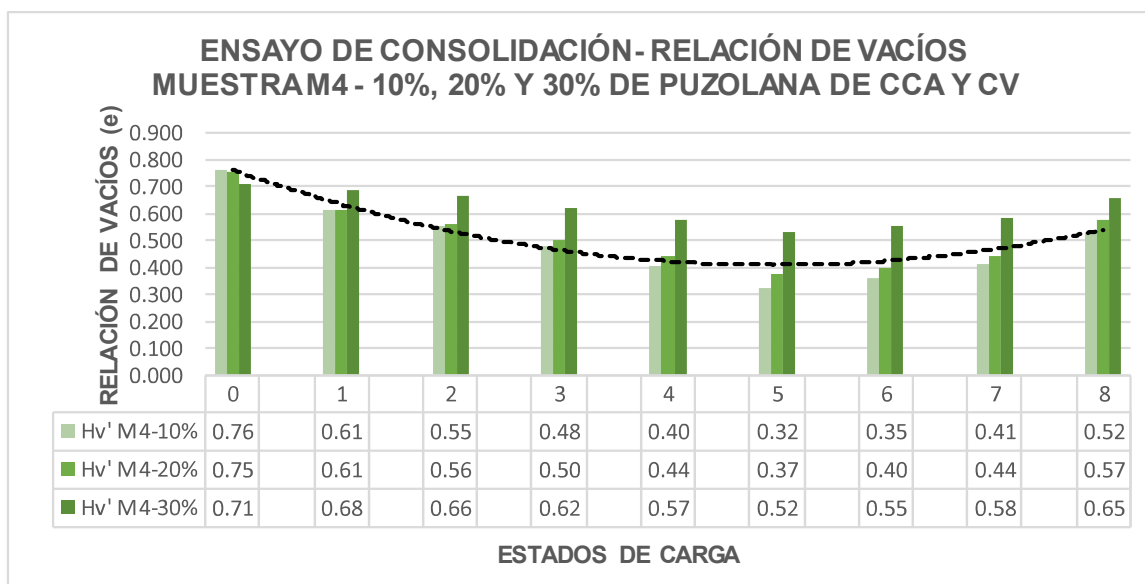
4.2.6.3 RELACIÓN DE VACÍOS

GRÁFICO 4. 17. RELACIÓN DE VACÍOS MUESTRA M3 - 10%, 20% Y 30% DE PUZOLANA DE CCA Y CV.



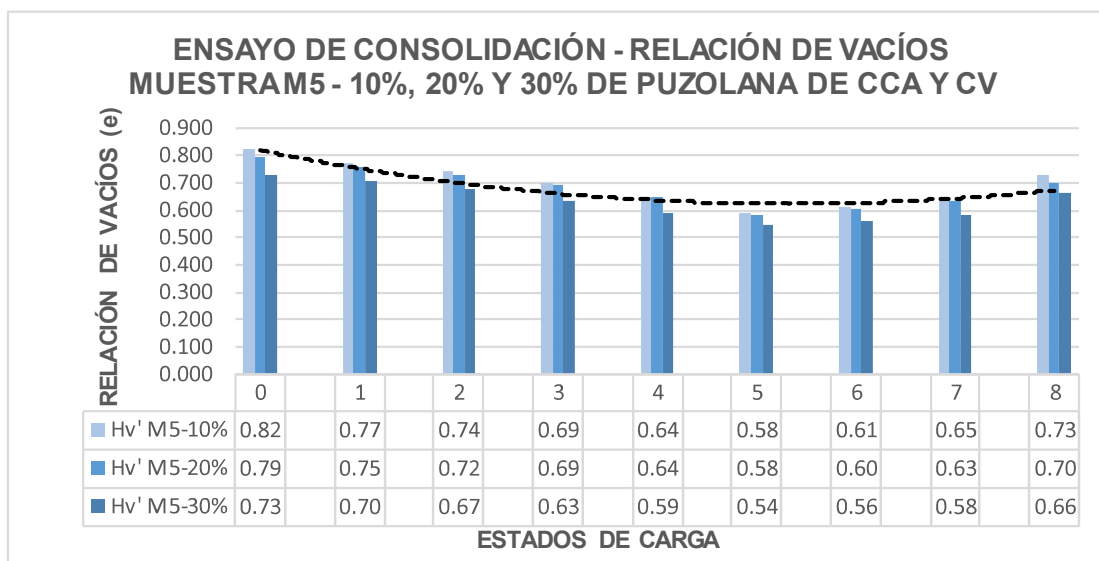
Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

GRÁFICO 4. 18. RELACIÓN DE VACÍOS MUESTRA M4 - 10%, 20% Y 30% DE PUZOLANA DE CCA Y CV.



Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

GRÁFICO 4. 19. RELACIÓN DE VACÍOS MUESTRA M5 - 10%, 20% Y 30% DE PUZOLANA DE CCA Y CV.



Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

Al analizar la relación de vacíos (Gráfico 4.17, Gráfico 4.18 y Gráfico 4.19), se puede observar que en el estado de carga 5, que es el de mayor magnitud de presión, la relación de vacíos alcanza el menor valor, lo que es lógico debido a que, a mayor carga, hay menor cantidad de espacios vacíos. Pero con respecto a las dosificaciones, mayor es el porcentaje de reemplazo, menor es la relación de vacíos, lo que indica que las muestras se comprimen más.

4.2.7 CORTE DIRECTO

Las variaciones del ángulo de fricción con respecto al porcentaje de reemplazo de puzolana de ceniza de cascarilla de arroz y puzolana de ceniza volcánica se pueden ver en el Gráfico 4.20.

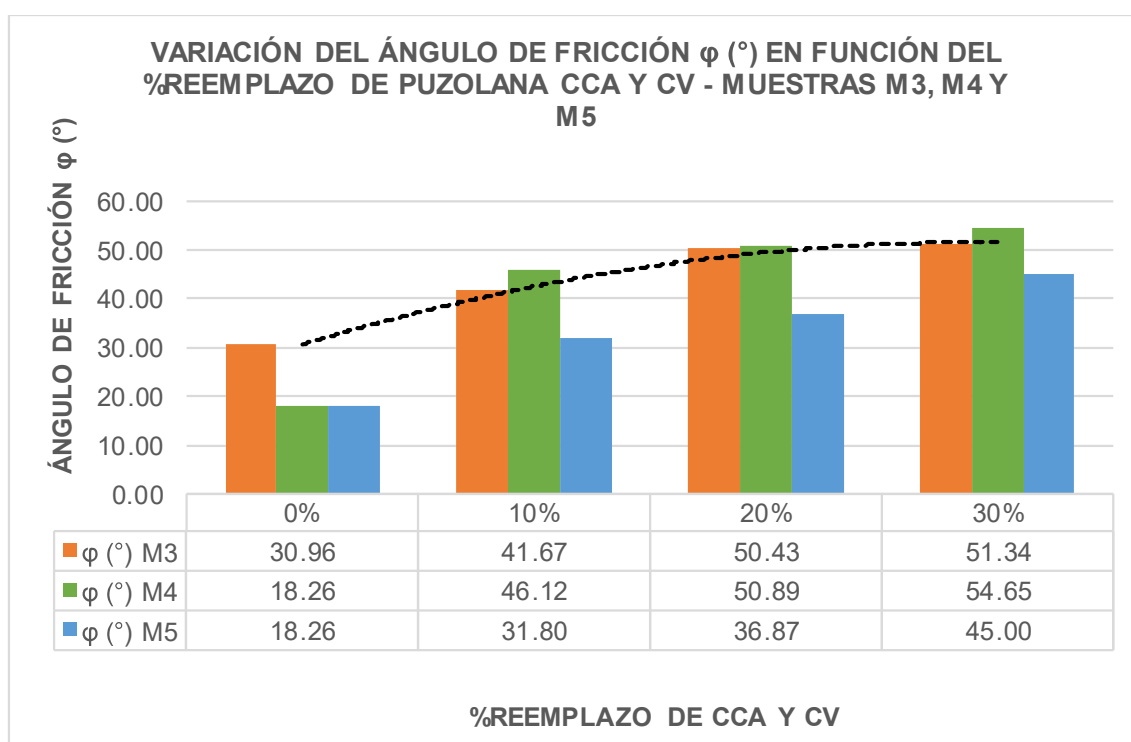
En la tabla se puede apreciar un aumento significativo del valor del ángulo de fricción interna de las muestras de suelo, conforme aumenta el porcentaje de reemplazo de puzolana de ceniza de cascarilla de arroz y puzolana de ceniza volcánica.

Estos resultados demuestran que el uso de puzolanas puede aumentar la resistencia al corte en arcillas, siendo una importante característica de

mejoramiento y estabilización si se desea mejorar propiedades mecánicas como la resistencia al corte

Las partículas de las puzolanas al contacto con agua y al mezclarlas con las muestras de arcilla, actúan como un cementante que permite incrementar la fricción interna entre las partículas sólidas del suelo lo que contribuye al incremento del ángulo de fricción interna y de la misma forma a restringir los cambios volumétricos de las arcillas.

GRÁFICO 4. 20. VARIACIÓN DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN ϕ (°) EN FUNCIÓN DEL %REEMPLAZO DE PUZOLANA DE CCA Y CV - MUESTRAS M3, M4 Y M5.



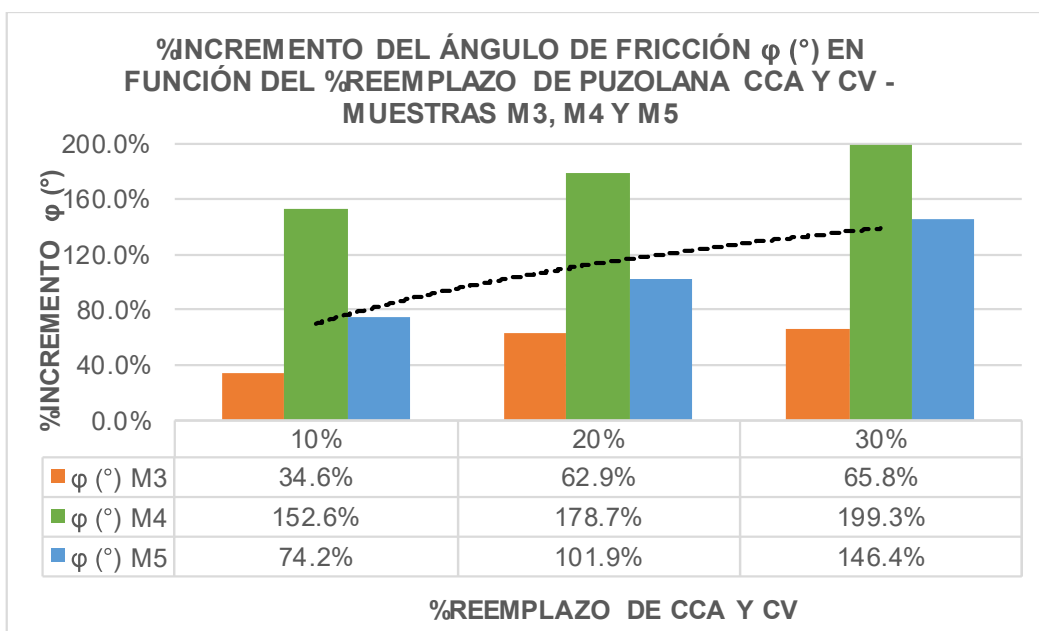
Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

Finalmente, respecto al porcentaje de variación del valor del ángulo de fricción interna se puede analizar en el Gráfico 4.21 que, a medida que aumentó el porcentaje de reemplazo de puzolanas, hubo incremento del ángulo de fricción.

Y de igual forma, es preciso decir que éste tiene un limitante en el que, por más que aumente el valor de porcentaje de reemplazo de puzolanas, el valor del ángulo de fricción interna llegará a un punto en el que no cambie o descienda su

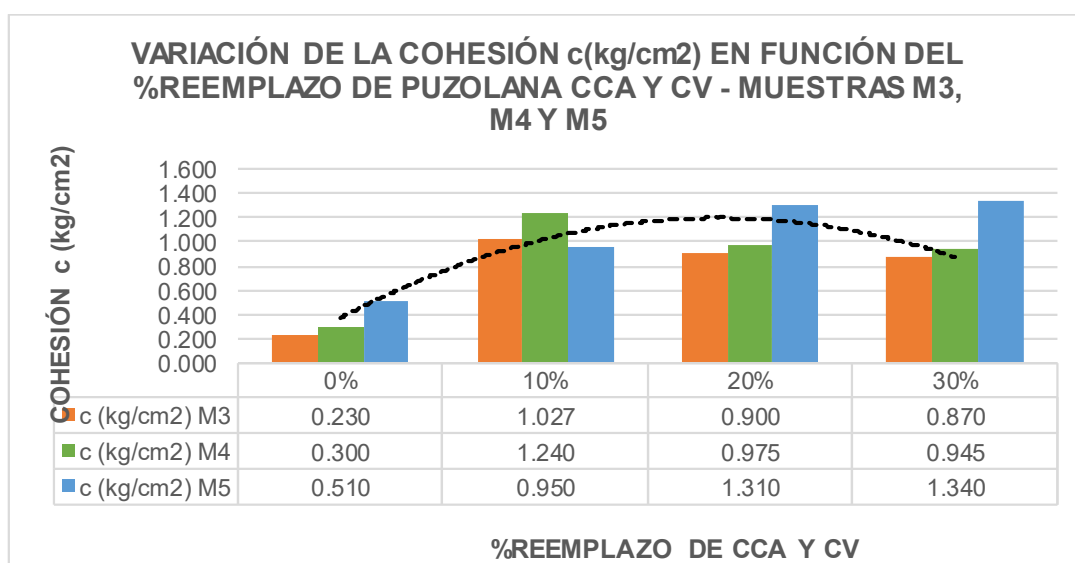
valor, como es el caso que se puede visualizar en el Gráfico 4.21 en donde el aumento del porcentaje de incremento entre el reemplazo del 20% y 30% es pequeño.

GRÁFICO 4. 21. PORCENTAJE DE INCREMENTO DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN ϕ (°) EN FUNCIÓN DEL %REEMPLAZO DE PUZOLANA CCA Y CV - MUESTRAS M3, M4 Y M5



Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

GRÁFICO 4. 22. VARIACIÓN DE LA COHESIÓN c (kg/cm²) EN FUNCIÓN DEL %REEMPLAZO DE PUZOLANA DE CCA Y CV - MUESTRAS M3. M4 Y M5.



Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

Con respecto al análisis de la cohesión, se puede visualizar una tendencia parabólica (ver Tabla 4.22) en donde el valor de cohesión alcanza su valor máximo con la dosificación del 10% en la mayoría de los casos.

Sin embargo, es necesario destacar que con todas las dosificaciones con las puzolanas el valor de la cohesión es mayor que en las muestras naturales.

El incremento de la cohesión en las muestras puede ser resultado del efecto cementante que las puzolanas proporcionan a la masa de suelo incrementado de esta manera la fuerza que existe entre las partículas, y reduciendo el cambio volumétrico como en el caso de arcillas expansivas.

4.2.8 MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO

TABLA 4. 12. ANÁLISIS EN EL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (100 μm)

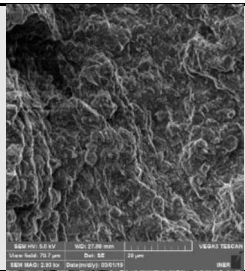
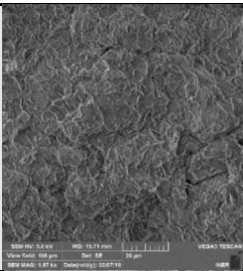
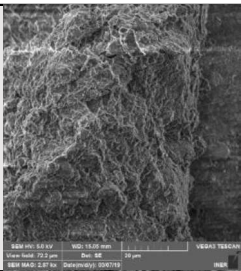
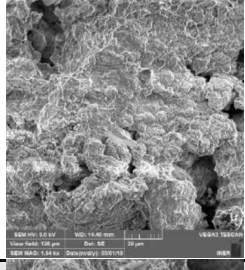
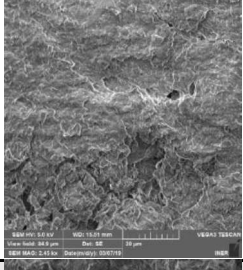
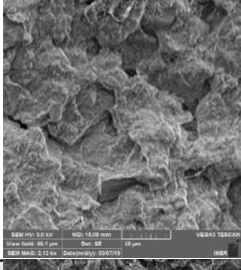
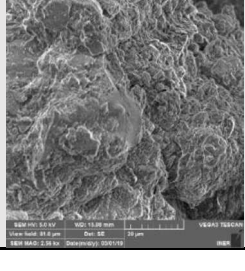
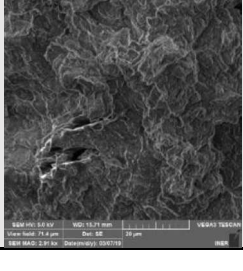
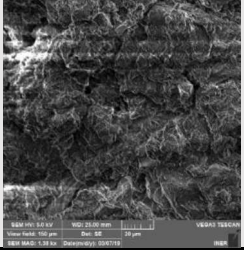
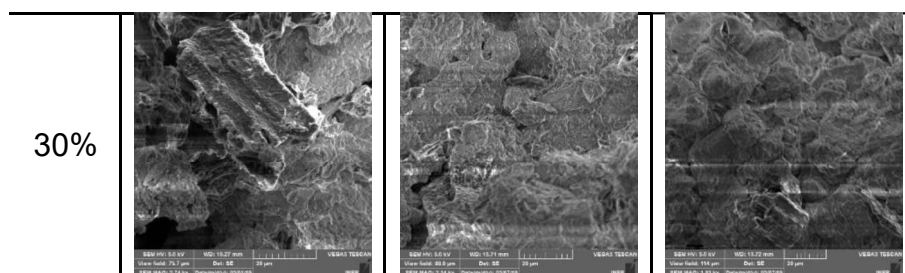
| ANÁLISIS EN EL MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIDO (100 μm) | | | |
|---|---|--|---|
| | M3 | M4 | M5 |
| NATURAL |  |  |  |
| 10% |  |  |  |
| 20% |  |  |  |

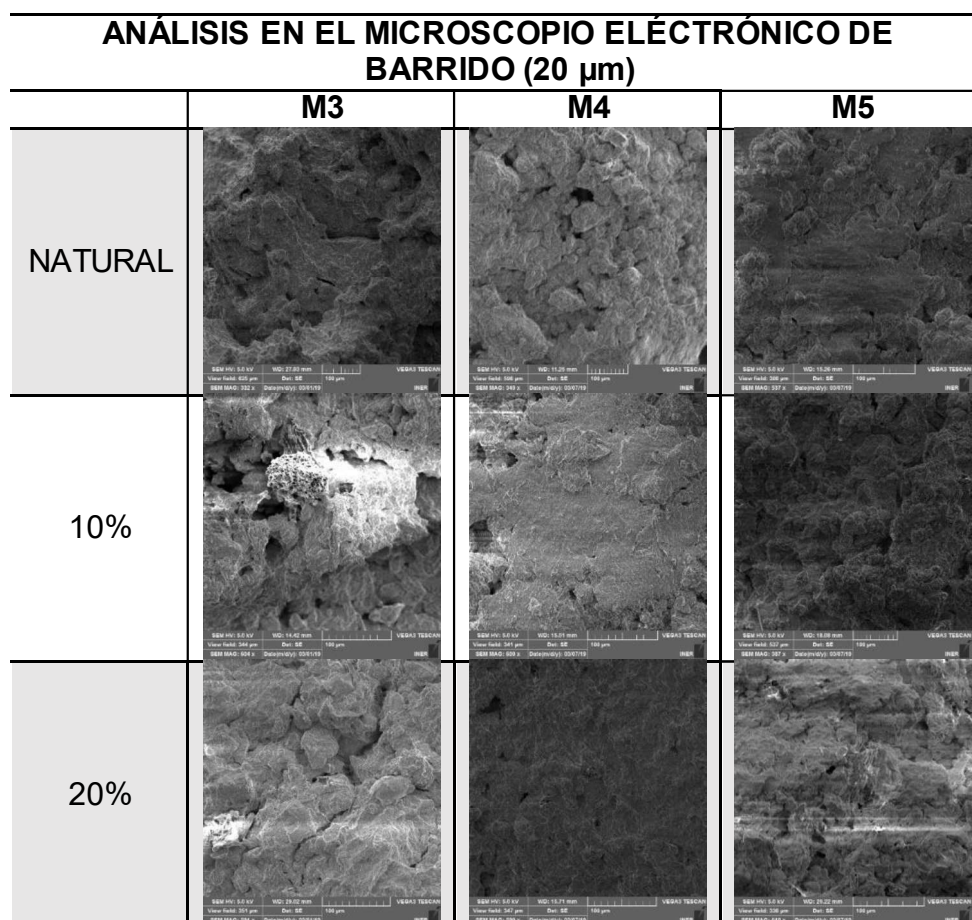
TABLA 4.12. CONTINUACIÓN



Elaborado por: (Licuy & Román, 2019)

El incremento de puzolana en las muestras de arcillas produce una estructura más aglomerada y compacta (ver Tabla 4.11 y Tabla 4.12) que evita el ingreso de agua en su estructura, disminuyendo la expansión del suelo.

TABLA 4. 13. ANÁLISIS EN EL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (20 µm)



CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Se evidenció que al reemplazar el 10, 20 y 30% de composición en peso de suelo por puzolana proveniente de la ceniza de la cascarilla de arroz y puzolana de ceniza volcánica, varios parámetros físicos y mecánicos cambiaron en las muestras de arcilla, reduciendo su límite líquido y plástico, menor expansión volumétrica, gravedad específica, densidad seca máxima; e incrementando su resistencia a la deformación y al deslizamiento, dando como resultado la estabilización de estas arcillas con comportamiento expansivo.

Experimentalmente se observó que la reutilización de muestras dosificadas para otros ensayos no es posible realizar, ya que, con la influencia de agua y temperatura, la puzolana pierde sus propiedades y los resultados obtenidos difieren significativamente.

Respecto al análisis del límite líquido se pudo encontrar que, incrementando la dosificación de las puzolanas en las muestras de arcillas expansivas, el valor del límite líquido se reduce con respecto a las muestras naturales. En donde cabe destacar que en los reemplazos de puzolanas al 20% y 30% se logra obtener mayores porcentajes de reducción los cuales varían entre 16% hasta un 32%.

Al analizar los resultados del límite plástico se pudo encontrar que, incrementando la dosificación de las puzolanas en las muestras de arcillas expansivas, la tendencia del porcentaje de reducción del límite plástico se reduce, es decir que con mayor reemplazo el cambio en el límite plástico será menor.

La variación de gravedad específica indica que conforme aumenta la dosificación de las puzolanas en las muestras de arcillas el valor gravedad específica disminuye, debido a que las puzolanas tienen un menor valor de gravedad

específica modificando así la gravedad específica de las arcillas. El mayor porcentaje de reducción ocurre cuando se realiza el reemplazo con un 30% de puzolanas, cuyos valores están entre el 5% y 8%.

En el ensayo de compactación Proctor los resultados de densidad seca máxima en todas las muestras dosificadas, el porcentaje de reducción presenta una relación parabólica (ver Gráfico 4.10), en donde se aprecia un mayor porcentaje de reducción de la densidad seca máxima con el 20% de reemplazo. Con el 20% de reemplazo se puede reducir la densidad seca máxima entre aproximadamente un 21% hasta un 41%

En el ensayo de índice de expansión de las arcillas se pudo encontrar que el reemplazo de puzolanas en las arcillas permite reducir este índice conforme se aumenta el porcentaje de reemplazo. Sin embargo, también se pudo examinar que esta reducción tiene un límite ya que entre los intervalos de porcentaje de reemplazo de 20% y 30% la tendencia de esta reducción cambia de pendiente (ver Gráfico 4.11) demostrando que con un porcentaje de reemplazo mayor al 30% la eficacia del uso de estas puzolanas se mínima.

El ensayo de permeabilidad en muestras naturales se realizó con carga variable, ya que, se logró evidenciar el flujo con cargas hasta de 120 cm. Sin embargo, para las muestras dosificadas la carga variable no fue suficiente para evidenciar el flujo, por lo que se procedió a ensayar las muestras con una carga constante de 3 Kg/cm³ por el transcurso de 100 horas, con lo cual no se observó flujo en todas las muestras excepto la muestra M5-30% con un $K_{20} = 5.35 \text{ E-}09 \text{ cm/s}$.

El uso de estas puzolanas ayuda a incrementar la resistencia al deslizamiento, debido que, adicionando más cantidad de puzolana, el porcentaje de incremento del ángulo de fricción aumenta también, brindándole más resistencia a las arcillas, lo que es beneficioso en la construcción de cimentaciones y taludes.

Las deformaciones por carga y descarga en los ensayos de consolidación son inversamente proporcionales al incremento de puzolana, los coeficientes de consolidación C_v , incrementan al igual que el contenido de puzolana, esto se

debe a que el límite líquido de las muestras disminuye con el aumento de puzolana.

Referente a los ensayos físicos y mecánicos ejecutados, los resultados obtenidos en el presente estudio fueron más satisfactorios con el porcentaje de reemplazo del 20%, ya que, se evidenció un mayor porcentaje de mejora en las propiedades, mientras que con el 30% de reemplazo, las mejoras no fueron significativas.

Se observó mediante el análisis de microscopio electrónico de barrido la estructura de las arcillas para 100 μm y 20 μm de aproximación, que el incremento de puzolana en las muestras produce una estructura más aglomerada y compacta que evita el ingreso de agua en su estructura, disminuyendo la expansión del suelo.

5.2 RECOMENDACIONES

Se obtuvieron resultados de estabilización satisfactorios para las muestras de suelo empleados, sin embargo, debido a la heterogeneidad y a la gran variedad existente en nuestro país se recomienda ampliar el estudio para suelos expansivos de otras provincias y regiones.

Para la estabilización de arcillas con puzolanas es necesario que se utilice únicamente el material que pase el tamiz N°200 con el objetivo de obtener una muestra homogénea en relación con el tamaño de partículas y consistencia del mismo, de lo contrario, no se obtendrá la misma eficiencia del método propuesto.

Extender el estudio de extracción de puzolanas de elementos naturales que en nuestro país se desechan en considerables cantidades como: bagazo de caña, estopa de coco, residuos de palma africana etc.

Realizar un estudio de la permanencia de las propiedades estabilizantes y de resistencia en el suelo y de esta forma también estimar la eficiencia del método propuesto.

Los porcentajes de humedad óptima obtenidos en los ensayos de compactación Proctor, se encuentran en los rangos de 18% a 21% aproximadamente, valores muy cercanos al contenido de humedad natural con el que se extrajeron las muestras, por lo que, se recomienda realizar la mezcla de puzolanas y suelo realizando un control de humedad que fluctúe en esos rangos.

BIBLIOGRAFÍA

- Aburto, M., & Rodríguez, D. (2012). *Caracterización de la resistencia de un material de banco para su uso como relleno compactado*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Acosta, K. I. (2015). *Ubicación del Contacto Bioestratigráfico Plioceno-Pleistoceno al noroeste de San José- Sur de la Provincia de Manabí*. Guayaquil: Universidad de Guayaquil.
- Álvarez, & Díaz, A. (2011). *Repositorio institucional CIMAV (Centro de Investigaciones en Materiales Avanzados)*. Obtenido de Comportamiento de terraplén carretero en arcillas expansivas del Estado de Veracruz: <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/1691/1/Comportamiento%20de%20terrapl%C3%A9n%20carretero%20en%20arcillas%20expansivas%20del%20estado%20de%20Veracruz.pdf>
- Álvarez, R. (2011). *CIMAV*. Obtenido de Comportamiento de terraplén carretero en arcillas expansivas del Estado de Veracruz: <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/1691>
- Amen, H., Lung, J., & Allauca, L. (2009). *Uso del sílice en hormigones de alto desempeño*. Guayaquil: Escuela Politécnica del Litoral. Obtenido de Uso de sílice en hormigones de alto desempeño.
- Angelone, S., Garibay, M., & Cauhapé, M. (2006). *Permeabilidad de Suelos*. Rosario: Universidad Nacional de Rosario.
- Arancibia, C. A. (2003). (Universidad Austral de Chile) Recuperado el 28 de 12 de 2018, de Arcillas expansivas: Comportamiento, identificación y su correlación mediante ensayos de fácil ejecución: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2003/bmfcia662a/pdf/bmfcia662a-TH.6.pdf>

- ASTM D2216. (2010). *Test Method for Laboratory Determination of Water Content os Soil and Rock*.
- ASTM D2434. (2006). *Standard Test Method for Permeability of Granular Soils*. United States: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D4829. (2011). *Standard Test Method for Expansion Index of Soils*. United States: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D7928. (2017). *Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis*. United States: American Society for Testing and Materials.
- Bauzá, J. D. (12 de 12 de 2015). *Depósito de Investigación Universidad de Sevilla*. Obtenido de <https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/32957>
- Besoain, E. (1985). *Mineralogía de arcillas de suelos*. (J. Escoto, Ed.) San José, Costa Rica: IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura). Recuperado el 30 de 12 de 2018
- Brooks, R. (2009). *Soil Stabilization with fyash and rice husk ash*. Philadelphia: International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences.
- Buitrón, S., & Enríquez, A. (2018). *Estudio de la Estabilización de arcillas expansivas de Manabí con ceniza del Volcán Tungurahua*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Burbano, N., Becerra, S., & Pasquel, E. (2006). *Caracterización Hidrogeológica de las Cuencas Portoviejo - Chone*. Quito: Intituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador.
- Can, L. R., Santamaría, G., & Canul, L. E. (2016). *Academia*. Recuperado el 30 de 12 de 2018, de Gito de cimentaciones debido a suelos expansivos: https://www.academia.edu/35083971/GIRO_DE_CIMENTACIONES_DEBIDO_A_SUELOS_EXPANSIVOS

- Cheng, Y., Wang, S., Li, J., Huang, X., Li, C., & Wu, J. (2018). *Engineering and mineralogical properties of stabilized expansive soil compositing lime and natural pozzolans*. Beijing, China: Elsevier.
- Chicaiza, E., & Oña, F. (2018). *Estabilización de arcillas expansivas de la Provincia de Manabí con puzonala extraída de ceniza de cascarilla de arroz*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Crespo, C. (2004). *Mecánica de Suelos y Cimentaciones*. México: Limusa.
- Das, B. (2015). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. México: Cengage Learning Editores, S.A.
- Duque, G., & Escobar, C. (2016). *Geomecánica*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Ganta, S. (2017). *Soil Stabilization With Rice Husk Ash And Lime Sludge*. Imayath Nagar, India: International Journal of Research.
- Garnica, P., Pérez, A., Gómez, J., & Obil, E. (2002). *Instituto Mexicano del Transporte (IMT)*. Obtenido de Estabilización de suelos con cloruro de sodio para uso en las vías terrestres: <https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt201.pdf>
- Guevara, A. (2015). *Repositorio digital UCL (Universidad Católica de Lovaina)*. Obtenido de Estudio de las propiedades de las cenizas del volcán Tungurahua, Ecuador, para identificar los factores que determinan su impacto en suelos y cultivos: <https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/object/boreal:170338>
- Hall, M., Robin, C., Beate, B., Mothes, P., & Monzier, M. (1999). Tungurahua Volcano, Ecuador: structure, eruptive history and hazards. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 91, 1-21.
- Handy, R., & Spangler, M. (2007). *Geotechnical Engineering: Soil and Foundation Principles and Practice*. New York: McGraw-Hill Education.

- Hernández, J., Mejía, D., & Zelaya, C. (12 de 2016). *Repositorio digital "Universidad de El Salvador"*. Obtenido de Propuesta de estabilización de suelos arcillosos para su aplicación en pavimentos rígidos en la Facultad Multidisciplinaria Oriental de la Universidad de El Salvador: <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/14342/1/50108285.pdf>
- Higuera, C., Gómez, J., & Pardo, Ó. (17 de 05 de 2012). *Dialnet*. Recuperado el 30 de 12 de 2018, de Repositorio Universidad de La Rioja: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4222676>
- IG EPN. (2014). *Observatorio del Volcán Tungurahua*. Quito: Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional.
- INPI. (2014). *Instituto Nacional de la Propiedad Industrial*. Obtenido de Boletín Temático sobre la ceniza volcánica: <http://www.ibepi.org/wp-content/uploads/2014/12/Cenizas1.pdf>
- Jiménez, J., & Justo, J. (1975). *Geotecnia y Cimientos I*. Madrid: Rueda.
- Landi, H., & Pesántez, C. (2015). *Estudio de la utilización de geotextiles como filtro en presas de tierra homogéneas*. Cuenca: Universidad de Cuenca. Obtenido de <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/21670/1/TESIS.pdf>
- Le Pennec, J., Jaya, D., Samaniego, P., Ramón, P., Moreno, S., Egred, J., & Van Der Plicht, J. (2008). The AD 1300–1700 eruptive periods at Tungurahua volcano, Ecuador, revealed by historical narratives, stratigraphy and radiocarbon dating. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176, 70-81.
- Le Pennec, J., Samaniego, P., Eissen, J., Hall, M., Molina, I., Robin, C., . . . Egred, J. (2005). *Los Peligros Volcánicos asociados con el Tungurahua*. Quito: Corporación Editora Nacional.
- LINAN. (2019). *Microscopios Electrónicos de Barrido*. Obtenido de http://www.linan-ipicyt.mx/Microscopio_de_Barrido.html

- Llorca, J. (1980). *CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas)*. Obtenido de Sobre la edificación en arcillas expansivas: <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/2311>
- López Lara, T. (11 de 1995). *Repositorio Institucional UAQ (Universidad Autónoma de Querétaro)*. Recuperado el 28 de 12 de 2018, de Resistencia al esfuerzo cortante en arcillas expansivas de Jurica, Querétaro: <http://ri.uaq.mx/handle/123456789/5102>
- López, T., Hernández, J., Horta, J., Coronado, A., & Castaño, M. (05 de 2010). *Revista Iberoamericana de Polímeros*. Obtenido de Polímeros para la estabilización volumétrica de arcillas expansivas: [file:///C:/Users/Asus-PC/Downloads/Polimeros_para_la_estabilizacion_volumetrica_de_ar%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Asus-PC/Downloads/Polimeros_para_la_estabilizacion_volumetrica_de_ar%20(1).pdf)
- Manosalvas, S. (04 de Septiembre de 2014). *Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional*. Obtenido de <https://www.igepn.edu.ec/detectores-de-lahares/content/18-tungurahua>
- Molina, J. (2002). *ResearchGate*. Obtenido de Adición de ceniza de cascarilla de arroz en hormigón compactado con rodillo: https://www.researchgate.net/profile/Hugo_Eguez/publication/28794174_Adicion_De_Ceniza_De_Cascarilla_De_Arroz_En_Hormigon_Compactado_Con_Rodillo/links/5760feda08aeeada5bc30d8f/Adicion-De-Ceniza-De-Cascarilla-De-Arroz-En-Hormigon-Compactado-Con-Rodillo.pdf
- Moreno, S., & Rodríguez, J. (2013). *Determinación de las propiedades índices y mecánicas de los suelos expansivos en la vía San Mateo-Esmeraldas zona de Winchele, realizando los ensayos con agua potable y con agua de mar*. Repositorio digital PUCE (Pontificia Universidad Católica del Ecuador). Obtenido de <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/6236>
- Nieto, J., & Parra, P. (1985). *Las arcillas expansivas: sus propiedades y estabilización*. Quito.

- Oweis, I., & Khera, R. (1998). *Geotechnology of waste management* (2 ed.). Estados Unidos. Recuperado el 30 de 12 de 2018
- Patrone, J., & Prefumo, J. (2010). *La Acción de los suelos expansivos sobre las cimentaciones. Métodos de Prevención y Control*. Montevideo: Facultad de Ingeniería de la Universidad de Montevideo.
- Patrone, J., & Prefumo, J. E. (2005). *Universidad de Montevideo* . Obtenido de La acción de suelos expansivos sobre las cimentaciones. Métodos de prevención y control: http://www.um.edu.uy/_upload/_descarga/web_descarga_204_Accindesuelosexpansivos..Nmero4.pdf
- Renau-Piqueras, J., & Faura, M. (1994). *Repositorio de la Universidad de Coruña (UDS)*. Obtenido de Principios básicos del Microscopio Electrónico de Barrido: https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/9313/CC-011_art_5.pdf
- Rukenya, T., Wambua, J., Kabubo, C., & Thiong'o, G. (2016). *Soil Stabilization Using Rice Husk Ash and Natural Lime as an Alternative to Cutting and Filling in Road Construction*. Kenia: Journal of Construction Engineering and Management .
- Salazar , J. (16 de 06 de 2005). *Manual de Construcción Natural. Construyendo con COB*. Obtenido de <https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/38824156/Manual-de-construccion-natural-Construyendo-con-Cob..pdf?AWSAccessKeyId=AKIAWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1546122505&Signature=reREAOhmotmrhyC2Alj7Ru8UYxA%3D&response-content-disposition=inline%3B%20file>
- Sánchez , M. A. (2014). *Estabilización de suelos expansivos con cal y cemento en el sector Calcical del cantón Tosagua provincia de Manabí*. Quito, Ecuador: PUCE (Pontificia Universidad Católica del Ecuador).

UA. (2019). *Universidad de Alicante*. Obtenido de Servicios Técnicos de Investigación: <https://ssti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-rayos-x/difraccion-de-rayos-x.html>

Valencia, C., & Huertas, L. (2018). *Análisis de granulometría por hidrómetro y un método automatizado para suelos bentoníticos*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.

Valle, W. A. (10 de 2010). *UPM (Universidad Politécnica de Madrid)*. Obtenido de Estabilización de suelos arcillosos plásticos con mineralizadores en ambientes sulfatados o yesíferos: http://oa.upm.es/4512/1/TESIS_MASTER_WILFREDO_ALFONSO_VALLE_AREAS.pdf