

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL  
MENCIÓN GEOTECNIA APLICADA**

-

**TEMA:**

Uso de saprolita mezclada con cemento como material de baja permeabilidad para núcleos de presas de relaves en la industria minera, evaluando su efectividad, eficiencia y sostenibilidad económica en un caso de estudio específico.

**AUTOR:**

Ing. Cristian Andres Orozco Ron

**TUTOR:**

-

Ing. Juan Merizalde

**Quito – Pichincha - Ecuador**

**2025**

# ÍNDICE

## Tabla de contenido

|  |    |
|--|----|
| Capítulo 1.....  | 7  |
| INTRODUCCIÓN .....   | 7  |
| Planteamiento del problema.....  | 9  |
| JUSTIFICACIÓN .....  | 12 |
| 1.2. OBJETIVOS.....  | 14 |
| 1.2.1. Objetivo general .....  | 14 |
| 1.2.2. Objetivos específicos.....  | 14 |
| 1.3. Alcances y limitaciones .....   | 15 |
| 1.4. Metodología general.....  | 17 |
| 1.5. Contenido de la memoria.....  | 21 |
| Capítulo 2.....  | 23 |
| MARCO TEORICO.....   | 23 |
| 2.1. Presas de Relaves Función y Requerimientos Técnicos.....              | 23 |
| 2.1.1. Función de las presas de relaves.....                               | 23 |
| 2.1.2. Metodología de construcción de presas de relaves.....               | 24 |
| 2.1.3. Partes principales de un dique de relaves (método aguas abajo)..... | 26 |
| 2.1.4. Requisitos técnicos para el núcleo de las presas de relaves .....   | 28 |
| 2.1.5. Marco normativo y guías internacionales aplicables.....             | 29 |
| 2.2. Condiciones climáticas relevantes en el proyecto Fruta del Norte..... | 32 |

|  |    |
|--|----|
| 2.2.1. Características Climáticas Generales .....                                | 32 |
| 2.2.2. Impacto Climático en el Comportamiento del Saprolito .....                | 32 |
| 2.2.3. Estrategias y Observaciones en Campo.....                                 | 33 |
| 2.2.4. Relevancia para el Proyecto .....   | 34 |
| 2.3. Características del Saprolito .....   | 34 |
| 2.3.1. Formación geológica y distribución del saprolito en Zamora Chinchipe..... | 35 |
| 2.3.2. Propiedades físico-mecánicas del saprolito .....                          | 35 |
| 2.3.3. Viabilidad del Saprolito sin Cemento.....                                 | 38 |
| 2.4. Estabilización de Suelos con Cemento.....                                   | 41 |
| 2.4.1. Importancia y contexto en regiones tropicales .....                       | 42 |
| 2.5. Fundamentos de la estabilización química .....                              | 44 |
| 2.5.1. Principios químicos involucrados en la estabilización con cemento.....    | 45 |
| 2.5.2. Efectos de las reacciones químicas en la mejora del suelo .....           | 46 |
| Capítulo 3.....  | 47 |
| METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....   | 47 |
| 3.1 Diseño de la investigación.....  | 48 |
| 3.1.1 Tipo de investigación .....  | 48 |
| 3.1.2 Justificación del diseño experimental.....                                 | 49 |
| 3.1.3 Etapas del diseño experimental .....                                       | 49 |
| 3.1.4 Variables del estudio .....  | 50 |
| 3.1.5 Herramientas y normativas utilizadas .....                                 | 51 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.2   | Diseño experimental.....   | 53 |
| 3.2.1 | Factores y niveles considerados .....                                  | 53 |
| 3.2.2 | Combinaciones y diseño experimental.....                               | 55 |
| 3.3   | Metodología de laboratorio .....                                       | 58 |
| 3.3.1 | Preparación y extracción de muestras .....                             | 58 |
| 3.3.2 | Procedimientos de ensayo .....   | 60 |
| 3.3.3 | Condiciones de curado y almacenamiento de muestras .....               | 64 |
| 3.4   | Metodología de campo .....   | 65 |
| 3.4.1 | Ensayos aplicados en el sitio .....                                    | 65 |
| 3.5   | Proceso constructivo y metodologías de mezclado en campo.....          | 69 |
| 3.5.1 | Procedimiento de extracción, transporte y colocación del material..... | 69 |
| 3.5.2 | Métodos de mezclado suelo–cemento .....                                | 73 |
| 3.4.1 | Metodología de compactación y criterios de aprobación .....            | 76 |
|       | ANÁLISIS DE DATOS.....   | 81 |
| 4.1   | Resultados de la evaluación en laboratorio .....                       | 81 |
| 4.1.1 | Condición inicial del saprolito sin adición de cemento.....            | 81 |
| 4.1.2 | Efecto de la adición de cemento y el tiempo de fraguado .....          | 83 |
| 4.2   | Resultados de la evaluación en campo .....                             | 88 |
| 4.2.1 | Propiedades índices del material colocado.....                         | 88 |
| 4.2.2 | Propiedades de resistencia y compactación del material colocado .....  | 90 |
| 4.2.3 | Infiltración y permeabilidad .....                                     | 94 |

|  |     |
|--|-----|
| 4.2.4 Ensayos avanzados de laboratorio en muestras inalteradas de campo .....      | 96  |
| 4.3 Observaciones de campo y desempeño constructivo .....                          | 98  |
| 4.3.1 Observaciones iniciales sin cemento .....                                    | 98  |
| 4.3.2 Desempeño con la adición de cemento .....                                    | 102 |
| 4.4 Análisis de la metodología de compactación y criterios de aprobación.....      | 105 |
| 4.5.1 Control de compactación – Proctor Estándar de un punto .....                 | 105 |
| 4.5.2 Criterios de aprobación alternativos y rango de control de compactación..... | 108 |
| 4.5.3 Impacto económico de la estabilización con cemento .....                     | 112 |
| 4.5 Evaluación de la Viabilidad Económica de la Mezcla Sapolito–Cemento ....       | 113 |
| 4.5.1 Incremento Presupuestal Directo.....   | 114 |
| 4.5.2 Beneficios Operativos y de Cronograma.....                                   | 114 |
| 4.5.3 Conclusión de Viabilidad Económica .....                                     | 115 |
| 4.6 Conclusiones parciales del análisis .....                                      | 116 |
| Capítulo 5.....  | 120 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....   | 120 |
| 5.1 Conclusiones.....  | 120 |
| 5.1.1 Conclusiones de los Ensayos de Laboratorio de la Mezcla Sapolito-Cemento     | 120 |
| 5.1.2 Conclusiones sobre el Núcleo de Baja Permeabilidad .....                     | 123 |
| 5.1.3 Cumplimiento de los Objetivos de la Investigación.....                       | 127 |
| 5.2 Recomendaciones .....  | 127 |
| 5.2.1 Recomendaciones Generales de Manejo y Construcción.....                      | 127 |

|  |     |
|--|-----|
| 5.2.2 Recomendaciones para Investigaciones Futuras ..... | 130 |
| REFERENCIAS.....   | 132 |
| Bibliografía .....                                       | 132 |
| ANEXOS .....   | 135 |

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

La construcción de presas de relaves constituye un desafío crítico en la ingeniería geotécnica y minera, ya que estas estructuras deben garantizar la contención segura y eficiente de los desechos generados durante el procesamiento de minerales. En este contexto, la selección de materiales para los núcleos de estas presas desempeña un papel esencial, ya que deben cumplir con requisitos estrictos de:

- Baja permeabilidad, para evitar fugas que comprometan la seguridad ambiental.
- Alta resistencia mecánica, que asegure la estabilidad de la presa bajo condiciones de carga.
- Sostenibilidad ambiental, minimizando el impacto asociado a la extracción y transporte de materiales.

Tradicionalmente, se han utilizado diversos materiales para este propósito, como arcillas compactadas y geomembranas, pero las limitaciones en términos de costos, disponibilidad y sostenibilidad han impulsado la búsqueda de alternativas más efectivas.

En este contexto, el saprolito, un material geológico derivado de la descomposición in situ de rocas ígneas y metamórficas, destaca como una opción viable. Sus características incluyen:

- Amplia disponibilidad en regiones mineras, como Zamora Chinchipe.
- Propiedades físicas favorables, que pueden optimizarse mediante estabilización.
- Potencial para ser combinado con cemento, mejorando significativamente su resistencia y permeabilidad.

Sin embargo, la investigación sobre esta mezcla es limitada, lo que genera incertidumbre respecto a su desempeño en condiciones operativas reales y en diversos contextos geológicos.

En el sur del Ecuador, específicamente en la provincia de Zamora Chinchipe, el contexto geológico es especialmente relevante. La región, caracterizada por su alta pluviosidad y biodiversidad, presenta abundantes depósitos de saprolito formados por procesos prolongados de meteorización química en un clima tropical húmedo. Este material se distingue por:

- Estructura granular y baja cohesión en su estado natural.
- Propiedades geotécnicas variables, que dependen de su origen geológico específico.

La combinación de saprolito con cemento podría generar un material optimizado para núcleos de presas de relaves, permitiendo que cumpla con las exigencias de baja permeabilidad, resistencia y sostenibilidad.

Estudios preliminares en proyectos mineros cercanos, como el de Fruta del Norte, han evaluado parámetros críticos de la mezcla de saprolito y cemento, incluyendo:

- Resistencia al esfuerzo cortante no drenado, para garantizar estabilidad estructural.
- Densidad alcanzada tras compactación, fundamental para la seguridad de las presas.
- Reducción de la permeabilidad, que evita fugas perjudiciales.

Estos hallazgos subrayan la necesidad de ampliar la investigación sobre el uso del saprolito en condiciones reales, considerando tanto las demandas técnicas como la sostenibilidad ambiental.

El presente trabajo se enmarca en la necesidad de explorar de manera integral las propiedades de esta mezcla innovadora. Al hacerlo, no solo se busca abordar los desafíos asociados a las presas de relaves, sino también contribuir a la adopción de prácticas más sostenibles en la industria minera, aprovechando los recursos locales y alineándose con las normativas internacionales en materia de seguridad y sostenibilidad

## **Planteamiento del problema**

### **Contextualización**

En la industria minera, las presas de relaves son estructuras esenciales para el manejo seguro de desechos minerales. Estas presas cumplen un rol crítico al evitar la dispersión de materiales tóxicos y garantizar la estabilidad ambiental de las operaciones. Sin embargo, el diseño de estas estructuras presenta desafíos significativos, siendo la selección de un material adecuado para el núcleo una de las decisiones más importantes. Este núcleo debe poseer propiedades como baja permeabilidad, alta resistencia y ductilidad, lo que asegura la seguridad estructural y la sostenibilidad ambiental de la presa.

Tradicionalmente, materiales como las arcillas compactadas y las geomembranas han sido utilizados para este propósito. No obstante, estos materiales tienen limitaciones en términos de costos, disponibilidad en ciertas ubicaciones y su impacto ambiental. En este contexto, la provincia de Zamora Chinchipe, ubicada en el sur de Ecuador, emerge como un área de interés debido a su riqueza en depósitos de saprolito, un material geológico resultado de la descomposición in situ de rocas ígneas y metamórficas bajo condiciones tropicales húmedas.

El saprolito, al ser un recurso local, presenta varias ventajas potenciales para la construcción de presas de relaves, como su disponibilidad abundante y sus propiedades físicas favorables.

Sin embargo, en su estado natural, este material carece de la cohesión y resistencia necesarias para satisfacer los estándares de seguridad exigidos. Es aquí donde la mezcla del saprolito con cemento ofrece una solución innovadora. El cemento puede estabilizar y mejorar las propiedades mecánicas del saprolito, convirtiéndolo en un material capaz de cumplir con los requisitos técnicos para núcleos de presas de relaves.

Pese a su potencial, la investigación sobre esta combinación de materiales es escasa. Hasta la fecha, no se ha evaluado de manera exhaustiva la capacidad del saprolito mezclado con cemento para cumplir con los estándares geotécnicos en términos de:

- **Permeabilidad**, garantizando una barrera efectiva contra la filtración de fluidos.
- **Resistencia mecánica**, para soportar las presiones ejercidas por los relaves almacenados.
- **Ductilidad**, que permita cierta deformación sin fractura bajo condiciones de carga.

Además, existen vacíos de conocimiento en relación con su impacto ambiental y su viabilidad económica, particularmente en el contexto de su aplicación en regiones como Zamora Chinchipe, donde la alta pluviosidad puede influir significativamente en las propiedades del material.

La necesidad de una alternativa sostenible y efectiva para los núcleos de presas de relaves subraya la relevancia de investigar esta propuesta. El uso de una mezcla de saprolito y cemento podría no solo resolver los desafíos técnicos y económicos asociados a la construcción de estas estructuras, sino también promover el desarrollo de tecnologías más seguras y respetuosas con el medio ambiente en la industria minera.

## **Formulación del problema**

¿Es posible que la mezcla de saprolito y cemento actúe como un material eficaz y sostenible para los núcleos de presas de relaves, cumpliendo con los requisitos de baja permeabilidad, alta resistencia mecánica y ductilidad en condiciones geológicas y climáticas como las de Zamora Chinchipe, al tiempo que minimiza el impacto ambiental y optimiza los costos operativos en comparación con los materiales tradicionales?

### **Preguntas directrices**

¿Cuáles son las propiedades físicas y mecánicas del saprolito mezclado con cemento y cómo se comparan con los materiales convencionales utilizados en los núcleos de presas de relaves?

¿Qué variaciones en la composición geológica y climática de Zamora Chinchipe pueden influir en el comportamiento de esta mezcla?

¿Qué métodos de caracterización física-mecánica son los más apropiados para evaluar la idoneidad de esta mezcla como material de construcción?

¿Existe potencial para extrapolar los resultados de esta investigación a otros contextos geológicos y proyectos mineros en el país o la región?

### **Delimitación del Objeto de Investigación**

El presente estudio se centra en evaluar la viabilidad del uso de una mezcla de saprolito y cemento como material alternativo para los núcleos de presas de relaves. La investigación se delimita geográficamente a la región de Zamora Chinchipe, al sur de Ecuador, donde la abundancia de saprolito y las condiciones geológicas locales proporcionan un contexto propicio para este análisis.

El alcance del trabajo incluye:

- **Caracterización físico-mecánica:** Evaluación de propiedades como permeabilidad, resistencia y ductilidad de la mezcla.

- **Ensayos comparativos:** Contrastación con materiales tradicionales utilizados en presas de relaves.
- **Viabilidad ambiental y económica:** Análisis del impacto ambiental y la rentabilidad del uso de saprolito mezclado con cemento en comparación con otras alternativas.
- **Aplicabilidad geotécnica:** Estudio de las condiciones específicas de la región que puedan influir en el desempeño del material.

Se excluyen del estudio aspectos relacionados con el diseño estructural integral de las presas, el seguimiento a largo plazo de su desempeño, y un análisis socioeconómico amplio de la implementación de esta tecnología. Esta delimitación asegura un enfoque preciso en los objetivos propuestos y en la generación de resultados relevantes para la ingeniería geotécnica aplicada.

## **JUSTIFICACIÓN**

La construcción de presas de relaves es un aspecto fundamental en la gestión de desechos de la industria minera, ya que asegura la contención segura de materiales residuales generados en el proceso extractivo. Sin embargo, los materiales tradicionalmente empleados para los núcleos de estas presas, como las arcillas compactadas, presentan limitaciones significativas en términos de disponibilidad, costo y sostenibilidad ambiental. En este contexto, el uso de una mezcla de saprolito y cemento como alternativa innovadora surge como una solución prometedora, especialmente en regiones como Zamora Chinchipe, Ecuador, donde la disponibilidad local de saprolito ofrece ventajas económicas y operativas.

La relevancia de este estudio radica en abordar vacíos de conocimiento en torno a las propiedades mecánicas y físico-químicas del saprolito estabilizado con cemento, particularmente en escenarios geológicos y climáticos desafiantes. La alta pluviosidad de la región, combinada con las demandas de estabilidad estructural, hace necesaria una evaluación exhaustiva de la viabilidad de esta mezcla para garantizar la funcionalidad y la seguridad de las presas de relaves.

Además, esta investigación tiene implicaciones significativas en términos de sostenibilidad. El uso de materiales locales reduce la necesidad de transportar recursos externos, disminuyendo la huella de carbono y los costos asociados. Al mismo tiempo, la combinación de saprolito y cemento podría ofrecer una solución más respetuosa con el medio ambiente, al minimizar el impacto ecológico en comparación con otras alternativas convencionales.

Desde una perspectiva económica, la posibilidad de emplear recursos disponibles en la región contribuye al desarrollo de metodologías más rentables para la industria minera, promoviendo prácticas que favorezcan la adopción de tecnologías locales. Este enfoque también tiene el potencial de influir en la formulación de políticas y regulaciones ambientales, estableciendo un marco para la implementación de alternativas más sostenibles y eficientes en la construcción de presas de relaves.

Por último, esta investigación no solo pretende resolver un problema técnico inmediato, sino también contribuir al cuerpo de conocimiento en el campo de la geotecnia aplicada, proporcionando una base científica sólida que puede ser adaptada a otros contextos geológicos y climáticos. Esto posiciona al proyecto como un aporte clave para avanzar hacia una minería más segura, eficiente y responsable.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo general**

- Evaluar la efectividad de la mezcla de saprolito y cemento utilizada por Lundin Gold en el Proyecto Fruta del Norte, como material alternativo para el núcleo de la presa de relaves de la mina, analizando sus propiedades de permeabilidad, resistencia mecánica y ductilidad, y considerando su viabilidad técnica, económica y ambiental en el contexto geológico y climático de la provincia de Zamora Chinchipe.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Caracterizar las propiedades físico-mecánicas del saprolito mezclado con cemento, utilizado en el núcleo de la presa de relaves del Proyecto Fruta del Norte, incluyendo su permeabilidad, resistencia al corte no drenado, resistencia a la compresión simple y comportamiento dúctil, de acuerdo con los ensayos de laboratorio y de campo realizados.
- Comparar el desempeño de la mezcla saprolito–cemento con las especificaciones y parámetros de diseño establecidos para materiales convencionales en núcleos de presas de relaves, identificando ventajas técnicas y limitaciones observadas durante su implementación en obra.
- Evaluar la viabilidad financiera de la solución implementada, comparando los costos asociados a la adquisición, transporte, dosificación y colocación del cemento, frente a alternativas constructivas sin aditivo.
- Proponer directrices técnicas y criterios de control de calidad para la implementación del saprolito estabilizado con cemento en núcleos de presas de relaves localizadas

en entornos tropicales de alta pluviosidad y con características geotécnicas similares a las del Proyecto Fruta del Norte.

### **1.3. Alcances y limitaciones**

#### Alcances

- Caracterizar experimentalmente las propiedades físico-mecánicas de la mezcla de saprolito y cemento utilizado en el núcleo de baja permeabilidad de la presa de relaves del Proyecto Fruta del Norte, enfocándose en su conductividad hidráulica, resistencia al corte no drenado, resistencia a la compresión simple y comportamiento dúctil, mediante los ensayos de laboratorio y campo documentados.
- Comparar el desempeño de la mezcla saprolito–cemento con las especificaciones de diseño y los rangos de desempeño de materiales tradicionalmente empleados en núcleos de presas de relaves (como arcillas compactadas), identificando ventajas y limitaciones observadas durante su aplicación en obra.
- Proponer lineamientos técnicos preliminares para la implementación del saprolito estabilizado con cemento en núcleos de presas de relaves, aplicables a entornos tropicales de alta pluviosidad y condiciones geotécnicas similares a las de Zamora Chinchipe, integrando criterios de compactación, resistencia mínima y control de calidad obtenidos en este caso de estudio

#### Limitaciones

- La investigación se circunscribe a muestras de saprolito provenientes de las áreas de préstamo Borrow 2, Borrow 4 y Borrow 5 del Proyecto Fruta del Norte, en la provincia de Zamora Chinchipe, lo que podría restringir la extrapolación directa de los resultados a otras zonas con características geológicas y climáticas distintas.

- El estudio se basa en datos de ensayos de laboratorio y en resultados de control de calidad obtenidos durante la construcción documentada, sin incluir pruebas controladas adicionales a escala piloto fuera del alcance del proyecto.
- El análisis del comportamiento a largo plazo del saprolito estabilizado con cemento en condiciones operativas reales no forma parte del alcance, aunque se discutirán posibles tendencias basadas en los datos de laboratorio y mediciones de campo disponibles.
- Las condiciones climáticas de alta pluviosidad características de la zona podrían influir en las propiedades del material, limitando la replicabilidad de los resultados en contextos con diferente régimen hídrico.
- La evaluación económica se centrará en los costos asociados a la adquisición, transporte, preparación y colocación de la mezcla saprolito–cemento, sin incluir un análisis socioeconómico detallado del impacto en las comunidades cercanas.

*Figura 1.- Localización de Borrow 2, 4 y 5 versus dique de relaves*



## **1.4. Metodología general**

La metodología de este estudio se centra en evaluar la viabilidad del uso de la mezcla de saprolito y cemento como material para el núcleo de baja permeabilidad del dique principal de la presa de relaves del Proyecto Fruta del Norte (Lundin Gold), en Zamora Chinchipe. El enfoque considera las condiciones geológicas y climáticas del sitio, caracterizadas por alta pluviosidad, presencia de suelos residuales saprofiticos y especificaciones técnicas de diseño y construcción del proyecto.

- **Fase 1: Diseño de la investigación**

- **Identificación del sitio de estudio**

El caso de estudio corresponde al núcleo de baja permeabilidad del dique principal y recrecimientos de la presa de relaves del Proyecto Fruta del Norte. Se delimitan las áreas de préstamo (Borrow 2, Borrow 4 y Borrow 5) como fuentes de material saprolítico, describiendo sus características geotécnicas y condiciones de humedad.

- **Selección de materiales**

El material principal es saprolito de baja plasticidad, extraído de las áreas de préstamo, con granulometría y humedad documentadas. El aditivo estabilizante es cemento Portland Tipo I, utilizado en obra por su disponibilidad y desempeño en suelos finos tropicales.

- **Definición de mezclas**

Se consideran proporciones de cemento en volumen entre 0.7% y 6%, conforme a los ensayos de laboratorio y las dosificaciones utilizadas en

campo, con el objetivo de optimizar resistencia, permeabilidad y trabajabilidad.

- **Fase 2: Preparación de muestras**

- **Procesamiento del saprolito**

En laboratorio, las muestras se acondicionaron siguiendo normas ASTM, manteniendo la humedad natural en la mayoría de los casos y aplicando el Proctor Estándar de un punto para determinar densidad máxima seca.

- **Fabricación de probetas**

Las mezclas saprolito–cemento se moldearon en probetas estándar de 71.1 mm de diámetro y 142.2 mm de altura, compactadas según ASTM D-698, y curadas bajo condiciones controladas para simular el comportamiento en campo.

- **Fase 3: Pruebas experimentales**

- **Ensayos de laboratorio**

- **Permeabilidad:** Ensayos con permeámetro de pared flexible (ASTM D5084) para determinar conductividad hidráulica.
- **Resistencia mecánica:**
  - Ensayo de veleta de corte (ASTM D2573) para resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ).
  - Ensayo de compresión simple no confinada (ASTM D2166) para resistencia a la compresión ( $q_u$ ).
  - Ensayos triaxiales CU y UU (ASTM D4767 y ASTM D2850) para determinar cohesión y comportamiento tensional.

- **Plasticidad y granulometría:** Límites de Atterberg (ASTM D4318), análisis granulométrico (ASTM D6913) e hidrometría (ASTM D7928).
- **Ensayos de campo**
  - Control de densidad in situ mediante cono de arena, densímetro nuclear y globo de goma.
  - Medición de resistencia al corte en capas colocadas con ensayo de veleta de campo.
  - Evaluación visual de textura y compactación del material en el núcleo.
- **Fase 4: Análisis de datos**
  - **Comparación con especificaciones del proyecto**

Los resultados se comparan con los requisitos de diseño del núcleo ( $S_u \geq 50$  kPa, conductividad hidráulica  $< 1 \times 10^{-7}$  m/s, densidad seca  $\geq 100\%$  Proctor de un punto) y con parámetros de materiales convencionales en presas de relaves.
  - **Análisis estadístico**

Se interpretan los datos considerando variabilidad entre áreas de préstamo, contenido de humedad y porcentaje de cemento.
  - **Evaluación económica**

Se analizan los costos unitarios documentados en obra para la mezcla saprolito–cemento frente al uso de saprolito sin aditivo, incluyendo transporte y preparación.

- **Fase 5: Interpretación y conclusiones**

- **Discusión de resultados**

Se interpretan los hallazgos técnicos y constructivos en el contexto del Proyecto Fruta del Norte, destacando el comportamiento del material frente a la alta pluviosidad y las exigencias de cronograma.

- **Recomendaciones prácticas**

Se proponen rangos óptimos de dosificación de cemento y criterios de compactación y control de calidad para condiciones tropicales.

- **Aplicaciones potenciales**

Se identifican posibles usos del saprolito estabilizado con cemento en otras presas de relaves o estructuras de contención en entornos tropicales con características geotécnicas similares.

Esta metodología está diseñada para responder a las particularidades geotécnicas del núcleo de baja permeabilidad de la presa de relaves del Proyecto Fruta del Norte (incluyendo el dique de arranque y los recrecimientos N°1 y N°2), garantizando un enfoque riguroso, acorde con las condiciones climáticas y geológicas locales de Zamora Chinchipe, y aplicable a las necesidades constructivas del proyecto.

## **1.5. Contenido de la memoria**

La presente memoria se estructura en siete capítulos, organizados de la siguiente manera:

- **Capítulo 1 – Introducción**

Presenta el contexto del Proyecto Fruta del Norte, el planteamiento del problema asociado a la utilización de saprolito con alta humedad en el núcleo de baja permeabilidad de la presa de relaves, la justificación del estudio, los objetivos generales y específicos, así como los alcances, limitaciones, metodología general y la estructura del documento.

- **Capítulo 2 – Marco teórico**

Revisa los conceptos fundamentales relacionados con la geotecnia de presas de relaves, propiedades y comportamiento de los suelos saprolíticos, principios de estabilización mecánica con cemento y métodos de evaluación de propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas de materiales para núcleos de baja permeabilidad, incorporando antecedentes y referencias normativas relevantes.

- **Capítulo 3 – Metodología experimental**

Describe las fases de investigación adoptadas, la caracterización geotécnica del sitio y de las áreas de préstamo, la preparación de mezclas saprolito–cemento, los ensayos de laboratorio y de campo realizados, y los criterios empleados para la comparación de resultados con las especificaciones del proyecto.

- **Capítulo 4 – Análisis de resultados**

Presenta y discute los resultados de las pruebas de laboratorio y campo, comparando el desempeño de la mezcla saprolito–cemento con los parámetros de diseño y con materiales

convencionales. Incluye el análisis de resistencia, permeabilidad, trabajabilidad, compactación y evaluación económica.

- **Capítulo 5 – Conclusiones y recomendaciones**

Expone las conclusiones derivadas de la investigación, destacando los rangos óptimos de dosificación de cemento y las implicaciones constructivas y ambientales, así como recomendaciones técnicas para la implementación de esta solución en contextos similares.

- **Referencias**

Contiene las fuentes bibliográficas y documentales consultadas, organizadas según formato académico.

- **Anexos**

Reúne información complementaria, como tablas completas de resultados, gráficos, fotografías de campo, fichas técnicas de ensayos y cualquier material adicional de apoyo al desarrollo del estudio.

## Capítulo 2.

### MARCO TEORICO

#### 2.1. Presas de Relaves Función y Requerimientos Técnicos

Las presas de relaves son estructuras críticas en la industria minera, diseñadas para el almacenamiento seguro de los residuos sólidos y líquidos generados durante el procesamiento de minerales. En el caso del Proyecto Fruta del Norte, la presa de relaves es una instalación de consecuencia extrema cuya construcción y operación deben cumplir estrictamente con criterios geotécnicos, hidrológicos y ambientales, con el fin de garantizar la seguridad de las operaciones y minimizar los riesgos asociados al manejo de relaves en las condiciones geológicas y climáticas de Zamora Chinchipe. (CDA, 2019)

##### 2.1.1. Función de las presas de relaves

Las presas de relaves cumplen múltiples funciones esenciales:

- **Almacenamiento seguro de desechos mineros.** Estas estructuras están diseñadas para evitar la dispersión de partículas tóxicas o metales pesados, protegiendo el medio ambiente circundante (Dunstan, 2010).
- **Control de la infiltración de líquidos.** A través de un núcleo de baja permeabilidad, se minimiza la filtración de líquidos contaminados hacia el suelo o cuerpos de agua adyacentes (Vaníček, 2008)
- **Garantía de estabilidad estructural.** Deben soportar grandes volúmenes de desechos sólidos y líquidos sin comprometer la integridad estructural a lo largo del tiempo (CDA, 2019).

La Canadian Dam Association (CDA) establece que las presas de relaves deben cumplir estrictos estándares de seguridad y diseño para garantizar su estabilidad a largo plazo. Estos

estándares enfatizan una planificación rigurosa, un diseño adecuado, una construcción de calidad y un monitoreo continuo durante la operación. Este enfoque integral tiene como objetivo prevenir fallas catastróficas, que podrían resultar en daños ambientales y sociales significativos (CDA, 2019).

Adicionalmente, las directrices de la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD) subrayan la importancia de documentar características como la geología, la hidrología y la sismicidad del sitio, además de realizar análisis de rotura de presa que permitan estimar áreas de impacto y planificar medidas de mitigación (ICOLD, 2020).

## **2.12. Metodología de construcción de presas de relaves**

La construcción secuencial de presas de relaves puede realizarse siguiendo tres metodologías principales, clasificadas según la dirección en que se eleva la presa con respecto al dique inicial o starter dam (McLeod & Bjelkevik, 2017; Klohn Crippen Berger [KCB], s.f.; Tailings.info, s.f.):

- **Método aguas arriba (Upstream)**

En este método, los recrecimientos se construyen hacia el interior del depósito, apoyándose parcialmente sobre los relaves previamente depositados. Su principal ventaja es el menor costo de construcción, ya que requiere un volumen reducido de materiales externos. Sin embargo, presenta menor estabilidad estructural, especialmente en zonas con alta sismicidad o condiciones climáticas húmedas, debido a que parte de la estructura se apoya sobre material potencialmente saturado (SpringerLink, 2024).

- **Método aguas abajo (Downstream)**

En este caso, los recrecimientos se realizan hacia el lado aguas abajo, sobre un talud previamente compactado y más estable. Este método suele incorporar

un núcleo impermeable (por ejemplo, de limo arenoso de baja plasticidad) y sistemas de drenaje interno para controlar la infiltración. Es considerado el método más seguro y estable, aunque requiere un mayor volumen de materiales de préstamo y, por tanto, una inversión más elevada (McLeod & Bjelkevik, 2017; KCB, s.f.).

- **Método de línea central (Centreline)**

Este enfoque combina características de los dos métodos anteriores. El eje o núcleo impermeable se eleva verticalmente, apoyándose en parte sobre relaves previamente depositados y en parte sobre el talud aguas abajo. Ofrece un equilibrio entre estabilidad y consumo de materiales, ya que requiere menos volumen que el método aguas abajo, pero proporciona mayor seguridad que el método aguas arriba (Tailings.info, s.f.).

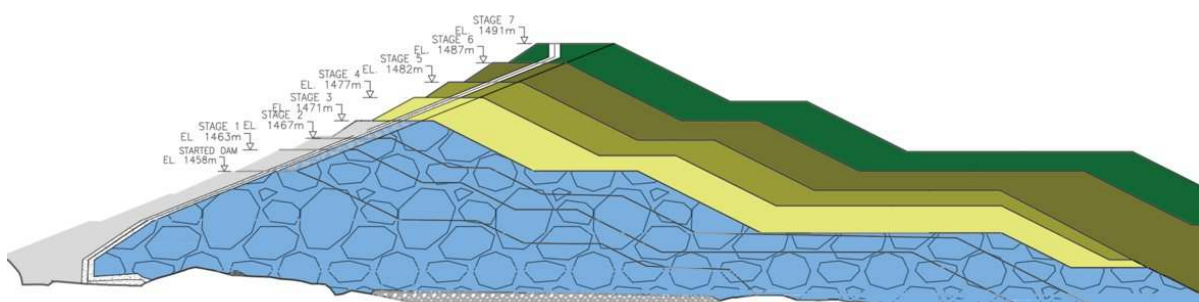
- **Elección del método constructivo**

La selección del método para una presa de relaves depende de factores como sismicidad, disponibilidad de materiales, condiciones geotécnicas, precipitaciones y costos. En zonas tropicales con alta pluviosidad y actividad sísmica, se recomienda el método aguas abajo por su mayor estabilidad (McLeod & Bjelkevik, 2017; Vick, 1990). El método aguas arriba ha sido prohibido en varios países de Latinoamérica—incluyendo Brasil, Chile, Perú y Ecuador— debido a fallas catastróficas como Brumadinho, siendo respaldada su restricción por normativas nacionales y recomendaciones internacionales (Reuters, 2019; Financial Times, 2024; MiningWatch / Earthworks, s.f.; SERNAGEOMIN, s.f.).

- **Construcción por etapas en el Proyecto Fruta del Norte**

La construcción del Depósito de Relaves (TSF) del Proyecto Fruta del Norte se ha ejecutado mediante un proceso de recremento continuo por etapas (stages), siguiendo el método observacional (Peck, 1969). Este enfoque ha permitido adaptar el diseño en función del desempeño observado en cada etapa, desde el Starter Dam.

*Figura 2.- Etapas constructivas de un dique de relaves*



### 2.13. Partes principales de un dique de relaves (método aguas abajo)

Un dique de relaves está compuesto por diferentes elementos que cumplen funciones específicas para garantizar su estabilidad, impermeabilidad y capacidad de contener los relaves.

- **Relaves**

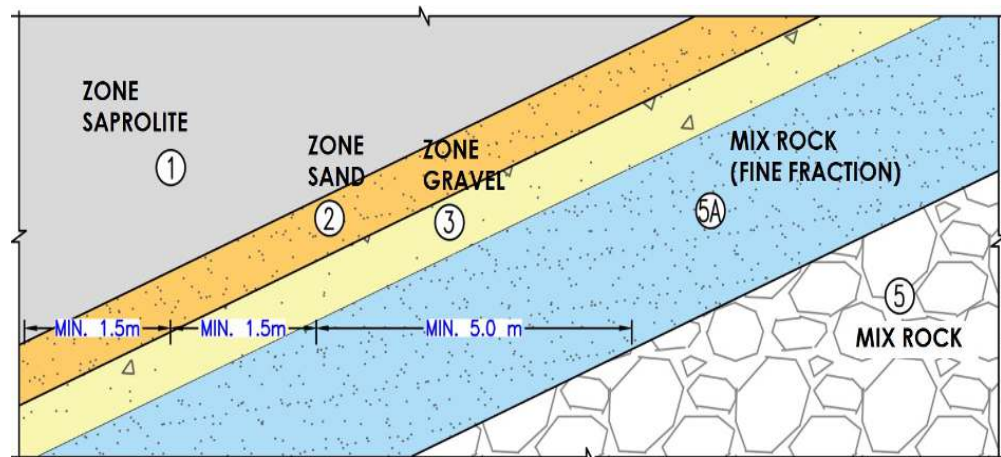
Los relaves corresponden al material residual resultante del procesamiento de minerales. Están conformados por una mezcla de partículas sólidas y agua, que se depositan en el embalse aguas arriba del dique. Este material puede contener minerales residuales, metales pesados y reactivos químicos, por lo que su manejo debe minimizar riesgos ambientales.

- **Núcleo impermeable (Zona 1)**

El núcleo es el elemento central y de mayor importancia hidráulica dentro de la presa. Está compuesto por un material de baja permeabilidad (como

arcilla compactada o limo arenoso estabilizado) y su función principal es reducir al mínimo la filtración de agua y contaminantes a través de la estructura. El núcleo debe presentar continuidad vertical y estar protegido contra erosión interna.

Figura 3.- Esquema de colocación de la zona 1



### Filtros

Se colocan aguas abajo del núcleo y actúan como una barrera selectiva que permite el paso del agua pero retiene partículas finas, evitando así procesos de erosión interna. Están diseñados siguiendo criterios de gradación granulométrica establecidos por normas internacionales (CDA, 2019; ICOLD, 2020).

#### ▪ Relleno general

Es el material de soporte del dique, ubicado aguas abajo del núcleo. Su función es proporcionar estabilidad estructural, resistencia al deslizamiento y capacidad para soportar las cargas estáticas y dinámicas del depósito. Este relleno se construye con material granular, roca o suelo compactado, seleccionados para resistir condiciones sísmicas y de alta pluviosidad.

Figura 4 Metodología de construcción aguas abajo de un dique de relaves (McLeod and Bjelkevik 2017)

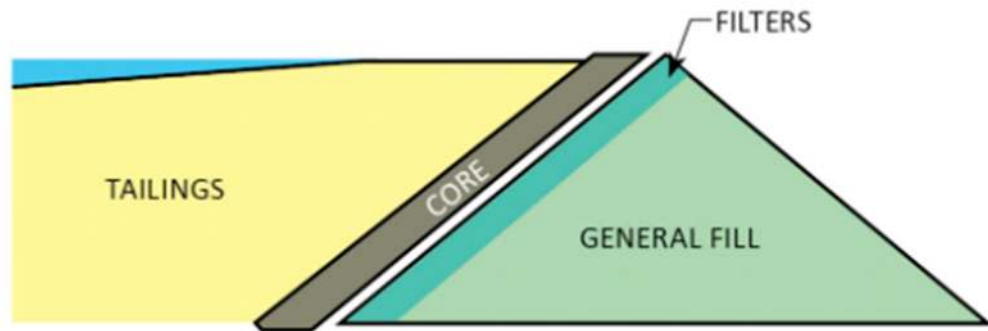
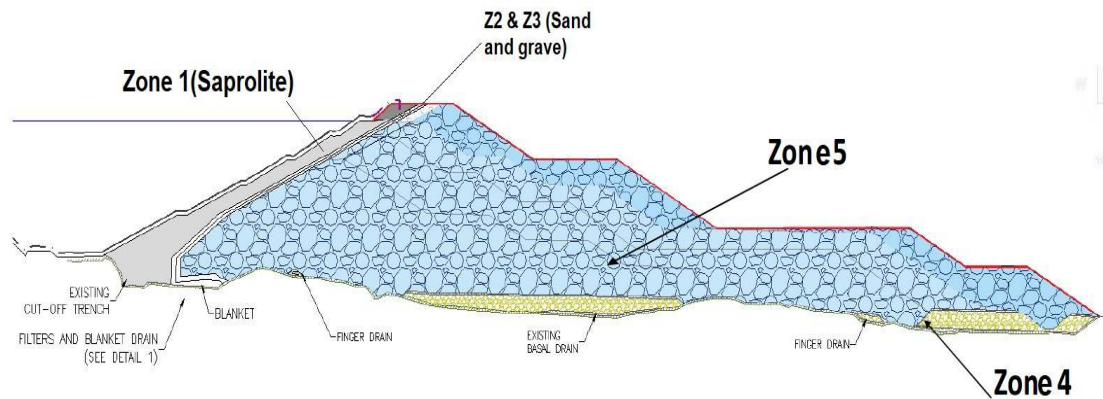


Figura 5.- Configuración del dique de relaves



## 2.14. Requisitos técnicos para el núcleo de las presas de relaves

El núcleo de una presa de relaves es un elemento estructural clave que cumple la función de controlar la filtración y contribuir a la estabilidad general de la presa. Su diseño y construcción deben satisfacer, como mínimo, los siguientes requisitos técnicos:

- **Baja permeabilidad.** El núcleo debe actuar como una barrera hidráulica para reducir el flujo de agua y prevenir el transporte de partículas finas o contaminantes a través de la estructura. De acuerdo con guías internacionales como la CDA (2019), la conductividad hidráulica recomendada para este componente suele ser igual o inferior a  $1 \times 10^{-7}$  m/s.

- **Alta resistencia mecánica.** Debe ser capaz de soportar las cargas derivadas del peso de los relaves, la presión hidrostática, la sedimentación de sólidos y las sollicitaciones dinámicas causadas por eventos extremos como terremotos o precipitaciones intensas. Generalmente, la resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ) mínima recomendada para núcleos de baja permeabilidad es del orden de 50 kPa (ICOLD, 2020).
- **Ductilidad adecuada.** El núcleo debe tener la capacidad de deformarse de manera controlada sin presentar fallas frágiles, lo que le permite adaptarse a movimientos diferenciales o asentamientos dentro de la presa sin perder su integridad.
- **Durabilidad a largo plazo.** Los materiales deben conservar sus propiedades hidráulicas y mecánicas a lo largo del tiempo, resistiendo la acción de agentes químicos presentes en los relaves, así como las variaciones de humedad y temperatura propias del entorno.

### **2.15. Marco normativo y guías internacionales aplicables**

El presente proyecto se enmarca en un sistema de normas y guías técnicas que garantizan la caracterización precisa, control de calidad y desempeño geotécnico del material empleado en la construcción del núcleo de la presa de relaves. Este marco normativo combina estándares internacionales (ASTM e ICOLD) con especificaciones técnicas propias del proyecto, adaptadas a las condiciones geotécnicas y climáticas de la zona de Fruta del Norte.

- **Normas ASTM (American Society for Testing and Materials)**

La caracterización y control de calidad del saprolito y del saprolito estabilizado con cemento se llevaron a cabo conforme a normas ASTM, ampliamente reconocidas en ingeniería geotécnica. Entre las principales:

- **Extracción y Moldeo de Muestras**
  - 1 ASTM D420 – Procedimiento para la investigación de suelos para ingeniería.
  - 2 ASTM D1632 – Preparación de muestras de suelo en moldes.
  - 3 ASTM D698 – Compactación en tres capas en moldes Proctor Standard.
- **Propiedades Índice y Clasificación**
  - 1 ASTM D4318 – Determinación de límites de Atterberg.
  - 2 ASTM D2487 – Clasificación de suelos (USCS).
  - 3 ASTM D6913 y D7928 – Análisis granulométrico por tamizado y sedimentación.
  - 4 ASTM D6572 – Determinación de dispersividad.
- **Resistencia al Corte y Compresión**
  - 1 ASTM D2573 – Resistencia al corte no drenado mediante veleta manual.
  - 2 ASTM D2166 – Compresión simple no confinada (UCS).
- **Permeabilidad**
  - 1 ASTM D3385 – Pruebas de infiltración en campo.
  - 2 ASTM D5084 – Ensayo de permeabilidad en pared flexible.
- **Ensayos Triaxiales**
  - 1 ASTM D4767 – Triaxial consolidado no drenado (CU).
  - 2 ASTM D2850 – Triaxial no consolidado no drenado (UU).
- **Compactación**
  - 1 ASTM D698 – Proctor Standard (5 puntos).
  - 2 Proctor de un punto para ajustes en campo según contenido de humedad natural.

- **Guías Internacionales Relevantes**

El comportamiento observado del saprolito y de la mezcla saprolito-cemento se contrastó con directrices de organismos y expertos internacionales:

- ICOLD (2009) – Tropical Residual Soils as Dam Foundation and Fill Material. Guía para el uso de suelos residuales en presas, con énfasis en ambientes tropicales.
- Blight (1997), Burton (1998) y Wesley (2010) – Publicaciones sobre mecánica de suelos residuales, estabilidad y control de humedad en climas húmedos.

- **Especificaciones Técnicas del Proyecto**

Para garantizar el cumplimiento de los requisitos de impermeabilidad y estabilidad estructural, se establecieron criterios propios:

- 1 Contenido de humedad  $\leq 38$  %.
- 2 Resistencia al corte no drenado ( $S_u$ )  $\geq 50$  kPa (veleta manual).
- 3 Densidad seca  $\geq 100$  % de la máxima densidad seca Proctor Standard.
- 4 Permeabilidad  $\leq 1 \times 10^{-7}$  m/s.
- 5 Granulometría dentro del huso definido en el diseño.

Estos criterios fueron adaptados a las condiciones específicas de alta pluviosidad y humedad natural elevada presentes en Zamora Chinchipe.

- **Síntesis del Marco Normativo**

El control y verificación de calidad del material se apoyó en normas ASTM para la caracterización, guías ICOLD para suelos residuales en presas y criterios específicos del proyecto. Esta combinación asegura que el diseño y construcción cumplan con estándares internacionales y respondan a las particularidades geotécnicas y climáticas del sitio.

## **2.2. Condiciones climáticas relevantes en el proyecto Fruta del Norte**

Las condiciones climáticas en el sitio de construcción de la presa de relaves constituyen un factor crítico y desafiante para el diseño y ejecución de las obras, debido a su ubicación en la región de la selva amazónica en el norte de los Andes de América del Sur. El clima tropical húmedo y la elevada pluviosidad influyen directamente en la trabajabilidad, compactación y resistencia del material saprolítico utilizado en el núcleo de la presa.

### **2.2.1. Características Climáticas Generales**

- **Tipo de Clima:** Selva tropical húmeda, con precipitaciones abundantes y alta humedad relativa durante todo el año.
- **Precipitaciones:**
  - Ausencia de una estación seca definida.
  - Promedio anual superior a 3.400 mm.
  - Durante la construcción (2019–2021), la precipitación mensual promedio fue de 285 mm.
  - Registros anuales: 3.608 mm (2019), 3.169 mm (2020) y 2.039 mm hasta julio de 2021.
  - Época más húmeda: de octubre a marzo, con lluvias intensas y sostenidas.
- **Humedad Relativa:** Promedio anual del 92 %.
- **Temperatura Media Anual:** 17,5 °C.

### **2.2.2. Impacto Climático en el Comportamiento del Saprolito**

- Exceso de Humedad Natural:

El contenido de humedad natural ( $w\%$ ) del saprolito supera en 10 % a 25 % el contenido óptimo de humedad obtenido en ensayos Proctor Standard.

- **Compactación Deficiente:**

La humedad excesiva impide alcanzar densidades y resistencias requeridas, generando baja trabajabilidad, resistencia al corte reducida y menor densidad seca.

- **Limitaciones de Métodos Tradicionales:**

Estrategias como aireación o mezcla con material seco resultan ineficientes o inviables debido a la humedad constante.

- **Retrabajos y Afectación del Cronograma:**

La saturación del material y la compactación deficiente provocan rechazo de capas y necesidad de retrabajo, con impacto directo en plazos constructivos.

- **Gestión de Agua Superficial:**

La alta pluviosidad requiere sistemas eficientes de evacuación de escorrentías para evitar estancamiento de agua y saturación localizada.

### **2.2.3. Estrategias y Observaciones en Campo**

- **Mejora con Cemento:**

La estabilización con cemento Portland Tipo I (3 %–6 % en volumen) aumentó la resistencia y trabajabilidad del saprolito, reduciendo su susceptibilidad a la saturación y la cantidad de capas rechazadas.

- **Restricciones de Ejecución:**

No se recomienda la colocación del núcleo de saprolito durante lluvias continuas, aun con estabilización química.

- Control de Aguas Superficiales:
  - Implementar planes de manejo de aguas pluviales para reducir exposición del material.
  - Sellar rápidamente las capas compactadas cuando se presenten lluvias.
  - Nivelar superficies para favorecer escorrentías sin generar pendientes que induzcan erosión.

- Condición de Aplicación del Cemento:

En escenarios de menor precipitación, podría evaluarse el uso de saprolito sin estabilización, siempre que se garantice compactación y resistencia requeridas.

#### **2.2.4. Relevancia para el Proyecto**

Las condiciones climáticas del sitio influyen de forma determinante en la selección del método constructivo, planificación de actividades, definición de especificaciones técnicas y estrategias de estabilización.

El éxito en la colocación del núcleo y su desempeño a largo plazo dependen de una adecuada adaptación de los procedimientos constructivos al régimen de lluvias y humedad local.

### **2.3. Características del Saprolito**

El saprolito, originado por la meteorización química y física de rocas ígneas y metamórficas, es un suelo residual común en regiones tropicales húmedas como Zamora Chinchipe, Ecuador. Su abundancia en esta zona lo convierte en un material de interés para aplicaciones geotécnicas,

particularmente en la construcción de núcleos de presas de relaves, siempre que se cumplan procesos de estabilización y compactación adecuados (ICOLD, 2009).

En el proyecto Fruta del Norte, el saprolito constituye el material predominante tanto en la fundación como en las zonas de préstamo del núcleo.

### **2.3.1. Formación geológica y distribución del saprolito en Zamora Chinchipe**

El saprolito en Zamora Chinchipe se desarrolla bajo condiciones climáticas tropicales húmedas, caracterizadas por altas precipitaciones y temperaturas que intensifican los procesos de meteorización de las rocas ígneas y metamórficas. Los perfiles típicos del suelo incluyen:

- Capa superior de laterita (0.5 a 1.5 m). Esta capa, rica en óxidos de hierro y aluminio, cubre la superficie del suelo.
- Capa intermedia de saprolito (40 a 60 m). Este material conserva la textura de la roca madre, pero se encuentra químicamente alterado y presenta una estructura granular descompuesta.
- Base de roca fresca. La transición hacia la roca intacta ocurre en las profundidades más bajas, generalmente compuesta por granodiorita y otras litologías presentes en la región (SENAGUA, 2018).

El saprolito es especialmente relevante en proyectos de construcción debido a su accesibilidad y abundancia cerca de sitios mineros clave, como Fruta del Norte, lo que reduce costos de transporte y extracción.

### **2.3.2. Propiedades físico-mecánicas del saprolito**

En su estado natural, el saprolito es un suelo residual que conserva parte de la estructura original de la roca madre, pero presenta propiedades que limitan su desempeño en aplicaciones geotécnicas de alta exigencia, como los núcleos de presas de relaves. Estas características

requieren ser consideradas en el diseño y construcción para garantizar el cumplimiento de los estándares de impermeabilidad y estabilidad.

- **Contenido de humedad y trabajabilidad**

- El saprolito en Zamora Chinchipe presenta un contenido de humedad natural entre un 10% y un 25% superior al contenido de humedad óptimo (OCH) determinado en laboratorio.
- En campo, se han registrado contenidos de humedad entre 25% y 45%, con un promedio de 33%, lo que implica baja trabajabilidad y dificulta alcanzar densidades secas adecuadas.
- El exceso de humedad reduce la resistencia al corte y puede generar problemas de compactación, especialmente en ambientes de alta pluviosidad.

- **Resistencia al corte**

- En su condición natural, la resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ) se encuentra entre 26 kPa y 68 kPa, con un promedio de 40 kPa, por debajo de los valores típicamente requeridos para núcleos de baja permeabilidad.
- El material presenta una sensibilidad ligera a moderada, con valores entre 1.0 y 4.0 y un promedio de 1.9, lo que indica pérdida de resistencia bajo cargas repetidas o perturbación.

- **Composición y granulometría**

- Se clasifica predominantemente como limo arenoso de baja plasticidad o arcilla arenosa de baja plasticidad, con un promedio de 55% de partículas pasantes por el tamiz #200 (material fino).

- La mineralogía de la fracción menor a 2  $\mu\text{m}$  está dominada por caolinita (64%) e illita (36%), minerales no expansivos y de baja dispersión, lo que favorece la estabilidad química del material, pero no garantiza baja permeabilidad.
  
- **Plasticidad**
  - El índice de plasticidad (IP) inicial puede llegar a valores de 18%, mientras que durante la colocación del material se registran valores promedio de 10%.
  - Estos valores se consideran de baja a media plasticidad, lo que influye en la cohesión y la respuesta del material frente a cambios de humedad.
  
- **Comportamiento hidráulico**
  - El saprolito natural presenta riesgo de infiltración debido a su alto contenido de humedad y su estructura granular descompuesta, que dificultan la compactación en condiciones climáticas húmedas.
  - Por esta razón, en proyectos como Fruta del Norte, no se permite su colocación en núcleos durante períodos prolongados de lluvia, a fin de evitar saturación excesiva y pérdida de resistencia.

En síntesis, aunque el saprolito es abundante y accesible en regiones tropicales como Zamora Chinchipe, su uso en estructuras críticas requiere un manejo cuidadoso para controlar el contenido de humedad, asegurar una compactación adecuada y minimizar la permeabilidad, factores esenciales para cumplir con los criterios de diseño de presas de relaves de consecuencia extrema.

### 2.3.3. Viabilidad del Saprolito sin Cemento

El saprolito tiene potencial para ser utilizado en núcleos de presas y otras estructuras geotécnicas cuando se maneja adecuadamente. Para cumplir con los requerimientos técnicos de baja permeabilidad, alta resistencia y durabilidad, es necesario aplicar técnicas como:

- **Características del Saprolito sin Cemento**

- **Alto Contenido de Humedad Natural:**

El saprolito presenta un contenido de humedad natural (w%) entre 10 % y 25 % superior al contenido de humedad óptimo (OCH) determinado mediante ensayos Standard Proctor.

- En el proyecto, el valor promedio fue del 33 %, aproximadamente 10 % por encima del OCH.
- Las áreas de préstamo (Borrow 2, 4 y 5) mostraron humedades naturales promedio entre 30,21 % y 34,37 %.

*Figura 6 Área de préstamo (borrow 2)*



*Figura 7 Área de préstamo (borrow 2)*

*Figura 8 Área de préstamo (borrow 4)*



- **Baja Trabajabilidad y Resistencia al Corte Reducida:**

El exceso de humedad limita la compactación, disminuye la resistencia al corte y reduce la densidad seca alcanzable.

- **Problemas de Compactación:**

Las condiciones de humedad impiden cumplir con los parámetros de compactación y resistencia exigidos en las especificaciones técnicas.

- **Influencia de las Condiciones Climáticas**

- **Precipitaciones Elevadas y Constantes:**

Ubicación en selva tropical con más de 3.400 mm de lluvia anual y ausencia de estación seca definida.

- **Susceptibilidad a la Saturación:**

El saprolito sin cemento se ve afectado rápidamente por la infiltración, lo que provoca pérdida de trabajabilidad y resistencia.

- **Dificultad en la Gestión de Agua Superficial:**

Las superficies irregulares generadas por compactación deficiente favorecen el estancamiento de agua, obligando en muchos casos a retirar material saturado.

- **Observaciones de Campo Antes de la Estabilización con Cemento**

- **Resistencia al Corte No Drenado (Su) Baja:**

Valores promedio de 40 kPa, inferiores al mínimo especificado de 50 kPa.

- **Rendimiento Insuficiente en Laboratorio:**

Ensayos de compresión simple no confinada (UCS) mostraron que, aun con incremento de resistencia con el tiempo, no se alcanzaron valores mínimos recomendados ( $q_u > 100$  kPa).

- **Efecto Negativo del Retrabajo:**

El retrabajado del material libera humedad adicional debido a la ruptura de enlaces químicos formados durante la meteorización, aumentando el contenido de agua y empeorando la trabajabilidad.

- **Métodos Tradicionales Ineficaces:**

Prácticas como aireación o mezcla con material seco resultaron impracticables por la humedad persistente del entorno.

- **Conclusiones sobre la Viabilidad sin Cemento**

- **No Viable en Clima Tropical Húmedo:**

En condiciones de alta precipitación y humedad relativa, el uso de saprolito sin aditivos resulta técnicamente inviable debido a su imposibilidad de alcanzar las especificaciones de resistencia y densidad.

- **Impacto en Plazos y Costos:**

La necesidad de retrabajar o reemplazar capas rechazadas afecta de manera directa el cronograma y el presupuesto de construcción.

- **Posible Uso en Otros Contextos:**

En regiones con menor precipitación y estaciones secas definidas, el uso de saprolito sin estabilización podría ser factible, siempre que se garantice su adecuada compactación y desempeño estructural.

#### **2.4. Estabilización de Suelos con Cemento**

La estabilización de suelos consiste en modificar las propiedades mecánicas, físicas y, en algunos casos, químicas de un material para que cumpla con los requisitos de desempeño establecidos en proyectos de ingeniería. Este proceso puede realizarse mediante métodos mecánicos (compactación, mezcla granulométrica) o métodos químicos, siendo estos últimos los más efectivos cuando el suelo presenta limitaciones de resistencia, trabajabilidad o durabilidad.

Dentro de los métodos químicos, la estabilización con cemento es una de las técnicas más utilizadas en la ingeniería geotécnica, ya que permite:

- Incrementar la resistencia al corte del material.
- Reducir la permeabilidad y, por tanto, la susceptibilidad a la infiltración y saturación.

- Mejorar la durabilidad y el comportamiento frente a ciclos de humedecimiento y secado.

En esta técnica, se incorpora un aglomerante hidráulico (generalmente cemento Portland) al suelo, el cual reacciona químicamente con el agua y los minerales presentes en el material. Esta reacción genera compuestos cementantes como el calcio-silicato-hidrato (CSH) y el calcio-aluminato-hidrato (CAH), que actúan como ligantes, cohesionando las partículas del suelo y formando una estructura interna más rígida y estable (Blight, 1997; Das, 2016).

La eficacia de la estabilización con cemento depende de factores como:

- Tipo y composición del suelo (contenido de arcilla, minerales reactivos, fracción granular).
- Contenido de humedad al momento de la mezcla.
- Proporción de cemento en relación con el peso seco del suelo.
- Tiempo y condiciones de curado, que influyen directamente en el desarrollo de la resistencia.

En entornos tropicales húmedos, como el de Zamora Chinchipe, la estabilización con cemento resulta particularmente útil para contrarrestar los efectos adversos de la alta humedad natural y las precipitaciones constantes, que dificultan la compactación y reducen la resistencia del saprolito sin tratamiento.

#### **2.4.1. Importancia y contexto en regiones tropicales**

La estabilización de suelos con cemento adquiere una relevancia estratégica en regiones tropicales debido a las condiciones climáticas y geotécnicas adversas que caracterizan estos entornos. En el caso del proyecto Fruta del Norte, ubicado en la selva amazónica de los Andes ecuatorianos, esta técnica permitió viabilizar el uso de saprolito como material para el núcleo de la presa de relaves, asegurando que cumpliera con los requisitos de resistencia y baja

permeabilidad. El uso de cemento en este tipo de ambientes constituye una alternativa eficaz para mejorar la resistencia, la trabajabilidad y reducir la susceptibilidad del material a la lluvia, condiciones que limitan el desempeño de los métodos constructivos tradicionales. La estabilización de suelos es, por lo tanto, esencial en proyectos de ingeniería geotécnica en zonas tropicales, especialmente en aquellos que requieren aprovechar materiales locales para reducir costos y minimizar el impacto ambiental.

Entre las principales ventajas de la estabilización se encuentran:

- **Factores clave del contexto tropical y geotécnico:**
  - **Precipitaciones sostenidas y ausencia de estación seca:** La zona presenta lluvias continuas todo el año, con promedios anuales que superan los 3000 mm. Durante el periodo de construcción, la precipitación mensual promedio fue de 285 mm, lo que mantiene el suelo en condiciones de alta humedad.
  - **Alto contenido de humedad natural del saprolito:** Entre un 10% y un 25% superior al óptimo de compactación (OCH), limitando la resistencia y densidad alcanzables. En campo, la humedad natural promedio fue un 10% mayor que el OCH.
  - **Baja trabajabilidad y resistencia inicial reducida:** Las primeras capas sin cemento presentaron una resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ) de 40 kPa, por debajo del mínimo requerido de 50 kPa.
  - **Limitaciones de métodos tradicionales:** Técnicas como aireación o mezcla con suelos secos resultan poco viables por la humedad persistente y el tiempo limitado de ejecución.
  
- **Importancia de la estabilización con cemento en este contexto:**

- **Incremento de resistencia y trabajabilidad:** El Su promedio en campo pasó de 40 kPa a 74 kPa (incremento del 85%), con aumentos de hasta 600% a las 24 horas en laboratorio. La hidratación del cemento mejoró la trabajabilidad y la capacidad de compactación.
- **Reducción de susceptibilidad a la lluvia:** El relleno estabilizado fue menos afectado por la saturación, disminuyendo la necesidad de retrabajos.
- **Cumplimiento de especificaciones:** Garantizó que el material alcanzara densidades y resistencias acordes con los criterios de diseño, manteniendo el cronograma.
- **Homogeneidad y baja permeabilidad:** El método de mezclado previo en zona de préstamo produjo mezclas uniformes y conductividades hidráulicas generalmente inferiores a  $1 \times 10^{-7}$  m/s.

En síntesis, en regiones tropicales con alta humedad y lluvias constantes, la estabilización de suelos con cemento no solo mejora las propiedades mecánicas y la impermeabilidad, sino que también asegura la viabilidad técnica y constructiva de proyectos de infraestructura crítica como presas de relaves, optimizando el uso de materiales locales y reduciendo riesgos constructivos.

## **2.5. Fundamentos de la estabilización química**

La estabilización química de suelos con cemento es una técnica consolidada en ingeniería geotécnica, que se basa en las reacciones entre los compuestos del cemento y los minerales presentes en el suelo. Este proceso modifica de manera favorable las propiedades mecánicas, físicas y químicas del material tratado, permitiendo su uso en aplicaciones estructurales críticas, como núcleos impermeables en presas de relaves.

En regiones tropicales húmedas, como Zamora Chinchipe, donde los suelos saprolíticos presentan alta humedad natural, baja cohesión y elevada permeabilidad, la estabilización química con cemento adquiere relevancia al mejorar la resistencia al corte, reducir la permeabilidad y aumentar la durabilidad del material bajo condiciones ambientales adversas.

### **2.5.1. Principios químicos involucrados en la estabilización con cemento**

- **Reacciones de hidratación del cemento:**

Cuando el cemento Portland Tipo I se mezcla con agua, se inicia la hidratación, un conjunto de reacciones químicas en las que compuestos como el silicato tricálcico ( $C_3S$ ) y el silicato dicálcico ( $C_2S$ ) reaccionan con el agua, generando:

- **Calcio-silicato-hidrato (CSH):** Es el principal producto cementante responsable de la resistencia y cohesión en la mezcla.
- **Calcio-aluminato-hidrato (CAH):** Contribuye adicionalmente a la cohesión del suelo estabilizado.

Estas reacciones aumentan la cohesión del suelo, reducen su porosidad y mejoran su resistencia al esfuerzo cortante, características fundamentales para aplicaciones geotécnicas (Das, 2016).

- **Interacción química con minerales arcillosos**

Los productos de hidratación reaccionan con los minerales presentes en el saprolito —principalmente caolinita (64%) e illita (36%)— formando enlaces químicos o puentes iónicos entre las partículas. Este proceso transforma un material granular o de baja cohesión en una matriz más sólida, estable y resistente a la saturación y a cargas externas (Blight, 1997).

### 2.5.2. Efectos de las reacciones químicas en la mejora del suelo

- **Incremento de la cohesión y la resistencia al corte:**
  - La formación de CSH y CAH refuerza los contactos entre partículas, limitando su deslizamiento y aumentando significativamente la cohesión interna. En suelos como el saprolito, que en estado natural presenta  $S_u \approx 40$  kPa, la estabilización con cemento puede elevar esta resistencia hasta valores superiores a 70 kPa, cumpliendo los criterios de diseño (Wesley, 2010).
- **Reducción de la permeabilidad:**
  - La disminución del tamaño y conectividad de los poros, producto de la cementación interna, reduce la conductividad hidráulica a valores típicos menores de  $1 \times 10^{-7}$  m/s, garantizando el funcionamiento del núcleo como barrera impermeable en presas de relaves (Blight, 1997).
- **Mayor durabilidad frente a ciclos de humedecimiento y secado:**
  - En climas tropicales, los ciclos repetidos de humedad y sequía pueden degradar rápidamente suelos no tratados. La matriz cementante generada en la estabilización incrementa la resistencia frente a estos ciclos, manteniendo la integridad estructural del material y prolongando la vida útil de las obras (Das, 2016).

## **Capítulo 3.**

### **METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

El desarrollo de esta investigación se estructuró en dos grandes etapas complementarias, orientadas a evaluar la viabilidad del saprolito estabilizado con cemento como material para el núcleo del dique principal de la relavera del proyecto Fruta del Norte. Ambas etapas combinaron el análisis de información existente, la caracterización del material y la validación mediante ensayos normalizados, reproduciendo las condiciones reales de construcción en las distintas fases de recrecimiento del sistema de almacenamiento de relaves (TSF, por sus siglas en inglés).

La primera etapa correspondió a la evaluación de la mezcla saprolito-cemento en laboratorio. Esta incluyó la recopilación y revisión de información geotécnica previa, la caracterización físico-mecánica del saprolito proveniente de las áreas de préstamo, y la ejecución de ensayos bajo normas ASTM. Se analizaron variables como la proporción de cemento, el contenido de humedad y el tiempo de curado, con el objetivo de determinar parámetros clave de resistencia, permeabilidad y plasticidad. Esta fase permitió establecer las relaciones de dosificación y las propiedades esperadas del material antes de su aplicación en campo.

La segunda etapa se centró en la evaluación del material saprolito-cemento en campo y su implementación constructiva. Comprendió el seguimiento y control del proceso de extracción, mezclado, colocación y compactación en las distintas etapas del dique (Etapa de Arranque, Recrecimientos 1 y 2), así como la aplicación de metodologías de control de calidad in situ. Se registraron observaciones sobre la trabajabilidad, la respuesta del material frente a condiciones climáticas adversas y el desempeño mecánico real, verificando su conformidad con los requisitos técnicos del proyecto.

En conjunto, ambas etapas proporcionaron una visión integral del comportamiento del saprolito estabilizado con cemento, permitiendo no solo evaluar su desempeño técnico bajo condiciones controladas y reales, sino también establecer criterios y lineamientos técnicos para su empleo en proyectos de características y exigencias similares.

### **3.1 Diseño de la investigación**

El diseño de esta investigación se fundamenta en un enfoque experimental orientado a evaluar las propiedades físico-mecánicas del saprolito estabilizado con cemento como material para el núcleo del dique principal de la relavera del proyecto Fruta del Norte. Este enfoque permite analizar, bajo condiciones controladas, el comportamiento del material ante variaciones en las proporciones de cemento, contenido de humedad y condiciones de compactación, replicando las etapas de recrecimiento del sistema de almacenamiento de relaves (TSF).

#### **3.1.1 Tipo de investigación**

- **Experimental**

El estudio utiliza ensayos de laboratorio para determinar cómo las propiedades del saprolito son afectadas por la adición de cemento en diferentes proporciones y bajo distintas condiciones de compactación.

- **Cuantitativa**

Los datos obtenidos se basan en mediciones precisas de parámetros como resistencia al esfuerzo cortante, permeabilidad, densidad seca máxima y contenido óptimo de humedad, permitiendo un análisis estadístico riguroso.

- **Aplicada**

Los resultados de la investigación están dirigidos a resolver un problema específico

como son la selección y mejora de un material local para aplicaciones geotécnicas en el núcleo de la relavera.

### **3.1.2 Justificación del diseño experimental**

El diseño experimental se seleccionó debido a la necesidad de replicar condiciones reales de carga y compactación del material durante las diferentes etapas del recremento del TSF. Este enfoque permite:

- **Simular escenarios reales:**

Las muestras de saprolito estabilizado fueron sometidas a condiciones similares a las que enfrentará el material en campo, como altas cargas y variaciones de humedad.

- **Analizar variables críticas:**

Se estudió el efecto de factores como el contenido de humedad (20%, 25% y 30%) y la proporción de cemento (5%, 8% y 12%).

- **Proveer resultados aplicables:**

Los datos generados servirán como base para definir parámetros de diseño geotécnico y criterios técnicos para futuras construcciones.

### **3.1.3 Etapas del diseño experimental**

- **Primera etapa:** Análisis preliminar y caracterización geotécnica

- **Recopilación de datos previos**

Se revisaron informes geotécnicos disponibles y se analizaron estudios previos relacionados con el comportamiento del saprolito en Zamora Chinchipe.

- **Salida a terreno**

Se realizaron visitas al sitio para recolectar muestras representativas de saprolito y medir in situ parámetros como:

- Densidad natural del material.
  - Permeabilidad inicial.
  - Granulometría y contenido de humedad.
- **Caracterización de casos de estudio:**

Se definieron los escenarios para las diferentes etapas de recremento del TSF (etapas 1, y 2) y las propiedades iniciales del saprolito que serán modificadas mediante estabilización con cemento.
- **Segunda etapa:** Ensayos experimentales en laboratorio
  - **Preparación de mezclas**

Las muestras de saprolito fueron mezcladas con cemento en proporciones definidas y sometidas a compactación bajo condiciones reales.
  - **Pruebas físico-mecánicas**

Se realizaron ensayos de compactación (Proctor modificado), permeabilidad (carga constante), y resistencia al esfuerzo cortante (triaxial no consolidado-drenado).
  - **Simulación de recremento del TSF**

Cada conjunto de ensayos se diseñó para representar las condiciones específicas de carga y compactación de las etapas 1, 2, 3 y 4.

### 3.1.4 Variables del estudio

- **Variables independientes**
  - Se emplearon diferentes relaciones de mezcla suelo-cemento, identificadas como:
    - Relación 26:1 (aproximadamente 3.85% de cemento).
    - Relación 25:1 (aproximadamente 4% de cemento).
    - Relación 24:1 (aproximadamente 4.16% de cemento).

- Contenido de humedad
  - Intervalo de humedad natural entre 20% y 32%, según las mediciones realizadas en el laboratorio y en campo
- **VARIABLES DEPENDIENTES:**
  - Resistencia al esfuerzo cortante: Determinada mediante pruebas triaxiales y ensayos de veleta en campo (ASTM D2573).
  - Permeabilidad del material compactado: Evaluada mediante métodos de laboratorio para mezclas suelo-cemento.
  - Densidad seca máxima y contenido óptimo de humedad:
    - Resultados específicos para las diferentes muestras, con densidades secas que varían entre 1490 kg/m<sup>3</sup> y 1570 kg/m<sup>3</sup>.
- **VARIABLES CONTROLADAS:**
  - Condiciones de compactación
    - Presión uniforme aplicada a las probetas, utilizando compactadores mecánicos y garantizando uniformidad durante el proceso.
  - Condiciones ambientales
    - Control de temperatura y humedad relativa durante el curado de las probetas en el laboratorio.
    - Turnos específicos de muestreo para evitar variaciones significativas en las propiedades del material debido a cambios climáticos.

### **3.1.5 Herramientas y normativas utilizadas**

- Normas internacionales:

- ASTM D1557: Método Proctor modificado para determinar la relación entre la humedad y la densidad del material.
- ASTM D5084: Ensayo de permeabilidad en suelos compactados con permeámetros de carga constante.
- ASTM D7181: Ensayos triaxiales para evaluar la resistencia al esfuerzo cortante en mezclas de suelo y cemento compactadas.
- ASTM D2573: Determinación del esfuerzo cortante en campo mediante veleta de suelos finos.
- ASTM D6938: Ensayo nuclear para la determinación de la densidad húmeda y seca en campo.
- **Equipos de laboratorio:**
  - **Prensa triaxial:** Para realizar pruebas de resistencia al esfuerzo cortante en laboratorio.
  - **Permeámetro de carga constante:** Para medir la permeabilidad en las mezclas suelo-cemento.
  - **Compactador mecánico:** Utilizado para realizar ensayos Proctor modificados y compactación uniforme de las probetas.
  - **Equipos de medición en campo:**
    - Cono de arena para la densidad en sitio (ASTM D1556).
    - Globo de goma para densidad de suelos in situ (ASTM D2167).
    - Equipos de medición nuclear para densidad y humedad (ASTM D6938).

## **3.2 Diseño experimental**

El presente estudio emplea un diseño experimental factorial, una metodología que permite analizar el efecto de múltiples factores y sus interacciones sobre las variables dependientes definidas. Este diseño se seleccionó debido a su capacidad para optimizar el número de experimentos necesarios, al evaluar simultáneamente diferentes niveles de las variables independientes.

### **3.2.1 Factores y niveles considerados**

En este estudio se identificaron dos factores principales que afectan significativamente las propiedades del suelo estabilizado con cemento: la proporción de cemento y el contenido de humedad. Estos factores, definidos como variables independientes, se estudiaron en tres niveles cada uno, siguiendo las relaciones comúnmente utilizadas en proyectos de ingeniería civil.

- **Proporción de cemento (Factor A):**

La proporción de cemento, determinada en función del volumen total de la mezcla, representa el porcentaje de cemento respecto al volumen combinado de suelo y agua. Este parámetro afecta directamente la resistencia al esfuerzo cortante, la densidad seca máxima y la permeabilidad del material estabilizado. Se consideraron tres niveles para este factor:

- **Nivel 1:** Relación 26:1 (96.3% suelo, 3.7% cemento).
  - **Nivel 2:** Relación 25:1 (96% suelo, 4% cemento).
  - **Nivel 3:** Relación 24:1 (95.8% suelo, 4.2% cemento).
- La selección de estos niveles se basa en recomendaciones técnicas previas y especificaciones de obras similares, garantizando una transición gradual entre proporciones para identificar el efecto incremental del cemento.
- **Contenido de humedad (Factor B)**

El contenido de humedad se define como el porcentaje de agua añadida en relación con el peso seco del suelo. Este parámetro afecta tanto la compactación como las propiedades mecánicas e hidráulicas del material. Los niveles seleccionados son:

- **Nivel 1: 20%.**
- **Nivel 2: 25%.**
- **Nivel 3: 30%.**

Estos valores corresponden a rangos típicos de humedad para mezclas estabilizadas, considerando la humedad óptima de compactación determinada mediante el ensayo Proctor modificado (ASTM D1557).

- **Combinación de factores y niveles:**

El diseño factorial  $3 \times 3 \times 3$  genera un total de nueve combinaciones posibles de las variables independientes:

- Combinación 1: Relación 26:1 y humedad 20%.
- Combinación 2: Relación 26:1 y humedad 25%.
- Combinación 3: Relación 26:1 y humedad 30%.
- Combinación 4: Relación 25:1 y humedad 20%.
- Combinación 5: Relación 25:1 y humedad 25%.
- Combinación 6: Relación 25:1 y humedad 30%.
- Combinación 7: Relación 24:1 y humedad 20%.
- Combinación 8: Relación 24:1 y humedad 25%.
- Combinación 9: Relación 24:1 y humedad 30%.

- **Justificación del análisis volumétrico:**

La elección del análisis volumétrico y las combinaciones específicas de factores se basaron en observaciones preliminares de las características particulares del saprolito

utilizado, tales como su límite líquido, límite plástico y comportamiento bajo condiciones ambientales reales del sitio de construcción. Estas características, junto con la influencia de los factores climáticos, demostraron que solo estas proporciones eran viables para garantizar la estabilidad y resistencia mecánica del núcleo del proyecto.

Además, los estudios previos revelaron que combinaciones fuera de este rango resultaban en mezclas no compactables o inadecuadas, comprometiendo la densidad seca máxima, la resistencia al esfuerzo cortante y la permeabilidad deseada. Por lo tanto, estas proporciones específicas constituyen las únicas opciones factibles para la construcción del núcleo compacto del proyecto, asegurando tanto su funcionalidad como su durabilidad bajo las condiciones previstas.

### **3.2.2 Combinaciones y diseño experimental**

El diseño experimental adoptado en este estudio corresponde a un diseño factorial completo  $3 \times 3 \times 3$ , en el cual se evaluaron los efectos combinados de dos factores principales, la proporción de cemento y el contenido de humedad, sobre las propiedades volumétricas del material estabilizado y compactado. Este enfoque permite no solo analizar el impacto individual de cada factor, sino también sus interacciones, lo que ofrece una perspectiva integral sobre el comportamiento del material bajo diferentes condiciones.

- **Detalle de las combinaciones evaluadas**

Los factores y niveles seleccionados generan un total de **nueve combinaciones experimentales**, como se muestra en la Tabla 1:

Tabla 1: Tabla de combinaciones

| Proporción suelo/cemento | Contenido de humedad (%) | Código de combinación |
|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 26:1                     | 20                       | A1B1                  |
| 26:1                     | 25                       | A1B2                  |
| 26:1                     | 30                       | A1B3                  |
| 25:1                     | 20                       | A2B1                  |
| 25:1                     | 25                       | A2B2                  |
| 25:1                     | 30                       | A2B3                  |
| 24:1                     | 20                       | A3B1                  |
| 24:1                     | 25                       | A3B2                  |
| 24:1                     | 30                       | A3B3                  |

- **Metodología para la preparación de las muestras**

- **Selección y preparación del material base (saprolito)**

Se seleccionaron muestras representativas del saprolito, garantizando que tuvieran características homogéneas en cuanto a granulometría, límites de Atterberg y contenido de humedad inicial. El material fue secado al aire y tamizado para eliminar partículas superiores al tamaño especificado por la normativa ASTM D1557.

- **Determinación del contenido de humedad**

El contenido de agua se ajustó en función del volumen seco del suelo para cada nivel de humedad (20%, 25% y 30%). Se emplearon balanzas digitales de alta precisión y equipos de mezclado para garantizar una distribución uniforme.

- **Incorporación del cemento**

Se añadieron las proporciones de cemento correspondientes a cada nivel (26:1, 25:1 y 24:1), calculadas en base al volumen total del material. La mezcla fue homogénea mediante procedimientos manuales y mecánicos, asegurando una distribución uniforme del estabilizante en toda la muestra.

- **Compactación**

Las muestras preparadas fueron compactadas siguiendo las especificaciones del método Proctor modificado (ASTM D1557), utilizando un compactador mecánico que aplicó la energía requerida para alcanzar la densidad seca máxima.

- **Curado**

Las probetas compactadas fueron sometidas a curado en condiciones controladas de temperatura y humedad durante un período de 7 y 28 días, de acuerdo con la normativa ASTM. Esto permitió observar los efectos de la hidratación del cemento y su interacción con el suelo.

- **Justificación del diseño experimental**

Este diseño factorial completo fue seleccionado debido a las siguientes ventajas:

1. **Análisis de interacciones:**

Permite evaluar cómo los factores de proporción de cemento y contenido de humedad interactúan entre sí, impactando las propiedades volumétricas, como densidad seca máxima, permeabilidad y resistencia al esfuerzo cortante.

2. **Generalización de resultados:**

Proporciona una base para predecir el comportamiento del material bajo combinaciones no evaluadas directamente, ampliando la aplicabilidad de los hallazgos.

3. **Optimización de recursos:**

Aunque es exhaustivo, el diseño factorial completo asegura que los recursos de laboratorio se utilicen de manera eficiente, generando datos suficientes para análisis estadísticos y conclusiones sólidas.

#### **4. Adaptación al material local:**

Las combinaciones seleccionadas reflejan las características específicas del saprolito evaluado, asegurando que el diseño experimental sea representativo de las condiciones del sitio y sus restricciones técnicas y ambientales.

### **3.3 Metodología de laboratorio**

#### **3.3.1 Preparación y extracción de muestras**

La preparación de las muestras constituyó una etapa fundamental para garantizar la representatividad del material saprolítico empleado en los ensayos de laboratorio. La extracción se ejecutó siguiendo los lineamientos establecidos en la norma ASTM D420, la cual establece los procedimientos adecuados para la exploración y muestreo de suelos destinados a investigaciones geotécnicas.

El procedimiento de campo consistió en la remoción del material superficial hasta una profundidad aproximada de 0,50 m, con el propósito de eliminar la capa alterada por intemperismo y asegurar que la muestra representara las condiciones naturales del depósito. Posteriormente, se realizó una descripción visual del suelo, considerando color, textura y presencia de heterogeneidades.

La recolección de material se llevó a cabo mediante la extracción de muestras alteradas de aproximadamente 6 kg, las cuales fueron colocadas en fundas plásticas y saquillos de hilo. Estas unidades fueron selladas herméticamente con el fin de evitar la pérdida de humedad y la alteración de las propiedades naturales del suelo. Cada muestra fue debidamente identificada y registrada fotográficamente, garantizando la trazabilidad durante su transporte y manipulación en el laboratorio.

En cuanto al moldeo de las probetas de laboratorio, se emplearon moldes cilíndricos de 71,1 mm de diámetro y 142,2 mm de altura, preparados de acuerdo con la norma ASTM D1632. El procedimiento incluyó los siguientes pasos:

Ejecución de ensayos índices preliminares, con el fin de caracterizar las propiedades iniciales del material.

Determinación de la densidad de referencia mediante la realización del Proctor Estándar de un punto a humedad natural, cuyos valores se utilizaron como parámetro para la preparación de cada molde.

Incorporación del cemento en las proporciones definidas, seguido de un mezclado manual hasta obtener una distribución homogénea.

Colocación del material mezclado en tres capas sucesivas, compactadas manualmente según la normativa ASTM D698.

Extracción de las probetas del molde utilizando un gato hidráulico, con el fin de evitar deformaciones durante el retiro.

Almacenamiento y curado controlado de las muestras hasta el momento de realizar los ensayos de resistencia al corte y compresión.

Este procedimiento permitió obtener especímenes con un nivel adecuado de representatividad y homogeneidad, condición esencial para el análisis confiable del comportamiento de la mezcla saprolito–cemento bajo diferentes dosificaciones y tiempos de fraguado.

*Figura 9 Área de préstamo (borrow 5)*



### **3.3.2 Procedimientos de ensayo**

Para el desarrollo de la fase experimental en laboratorio se utilizaron diferentes relaciones de cemento en la mezcla saprolito–cemento, específicamente 0.7%, 1.5%, 2.3%, 3.0%, 4.5% y 6.0% en volumen total del material. Con el fin de evaluar el proceso de incremento de resistencia en el tiempo, se establecieron periodos de fraguado que incluyeron las siguientes edades: inmediatamente, a 1 hora, a 3 horas, a 1 día, a 3 días, a 7 días y a 28 días.

- **Ensayos índice**

Los ensayos índices tuvieron como finalidad caracterizar las propiedades básicas del suelo y su variación con el contenido de cemento:

- **Contenido de humedad:** Se analizó la evolución del contenido de humedad con respecto al tiempo de fraguado. Se determinó que, a los siete días, la disminución del contenido de humedad natural no superó el 2%, indicando que el aumento de resistencia no estuvo asociado a una pérdida significativa de humedad.

- Límites de Atterberg: Se evaluaron conforme a la norma ASTM D4318. Las mediciones se realizaron en mezclas con 1%, 2%, 3%, 4% y 6% de cemento y a diferentes tiempos de mezclado (1, 7 y 28 días). El material natural presentó un Índice de Plasticidad (IP) de 18, el cual disminuyó a valores entre 8 y 11 con la adición de cemento, principalmente por un incremento en el Límite Plástico (LP). La clasificación resultó predominantemente como CL (arcilla de baja plasticidad) y ML (limo de baja plasticidad).
- Granulometría, hidrometría y dispersión: Los análisis granulométricos se realizaron según las normas ASTM D6913 y ASTM D7928, obteniéndose un promedio de 55% de material fino (pasante #200). Adicionalmente, mediante la norma ASTM D6572, se estableció que los materiales eran Grado 1 no dispersivos, lo cual es consistente con su mineralogía, compuesta mayoritariamente por caolinita (64%) y en menor proporción por illita (36%).

- **Ensayo de compactación**

Para la preparación de las probetas se aplicó el Proctor Estándar de un punto a humedad natural, determinando la densidad de referencia utilizada en cada molde. Este procedimiento se adoptó porque el contenido de humedad natural del saprolito resultó superior al óptimo del Proctor Estándar tradicional, lo que justificó la elección de este método simplificado.

- **Ensayos mecánicos**

Se realizaron dos ensayos principales con el fin de estimar la resistencia al corte del material:

**Ensayo de veleta manual (ASTM D2573):** Este procedimiento permitió medir la resistencia al corte no drenado de las mezclas compactadas. Se estableció un valor mínimo de aceptación de 50 kPa como criterio de aprobación.

- Para un contenido de humedad de 30%, fue necesario al menos 3% de cemento para superar los 50 kPa después de una hora.
- Para un contenido de humedad de 33%, el mínimo recomendado fue 2.3% de cemento, alcanzando los valores requeridos en el mismo lapso.
- Para un contenido de humedad de 36%, se requirió un 4.5% de cemento, con superación de los 50 kPa a partir de las tres horas.
- En términos generales, la resistencia al corte no drenado aumentó entre 170% y 600% entre la primera hora y las 24 horas, alcanzándose entre el 60% y 90% de la resistencia de siete días en las primeras 24 horas.
- Las mezclas con 6% de cemento resultaron demasiado rígidas entre los tres y siete días, impidiendo la ejecución del ensayo con veleta.

**Ensayo de compresión simple no confinada (ASTM D2166):** Este ensayo se aplicó a las probetas moldeadas con el fin de evaluar la resistencia a compresión simple ( $q_u$ ). De acuerdo con la normativa, la resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ) corresponde a la mitad de  $q_u$ , estableciéndose un umbral de referencia de 100 kPa para su aceptación.

- El material natural no alcanzó valores superiores a 100 kPa.
- Para un contenido de humedad de 30%, se requirió un mínimo de 3% de cemento, logrando superar los 100 kPa en la primera hora.
- Para un contenido de humedad de 33%, únicamente la mezcla con 2.3% de cemento superó los 100 kPa, y únicamente a los siete días.
- Para un contenido de humedad de 36%, fue necesario al menos 4.5% de cemento para alcanzar la resistencia de 100 kPa a partir de las tres horas.
- En todos los casos, la resistencia incrementó notablemente, registrándose un aumento entre 100% y 800% en las primeras 24 horas, alcanzando entre el 71% y 95% de la resistencia a siete días en ese mismo periodo. Se observó que las mezclas con menor humedad desarrollaron resistencias significativamente mayores con menores cantidades de cemento.

**Relación deformación unitaria–esfuerzo de compresión:** También evaluada según la ASTM D2166, esta relación se analizó en las probetas a los siete días de fraguado. Los resultados indicaron que a mayor contenido de cemento el material presentaba mayores resistencias y una tendencia a incrementar su rigidez, adoptando un comportamiento más frágil. No obstante, se señaló que el modo de falla en las mezclas suelo–cemento difiere del observado en un ensayo UCS tradicional, por lo que esta conclusión debe tomarse con cautela.

### **3.3.3 Condiciones de curado y almacenamiento de muestras**

El curado y almacenamiento de las probetas de saprolito–cemento representó una etapa fundamental en la metodología de laboratorio, ya que permitió preservar las propiedades físico–mecánicas de las mezclas y garantizar la confiabilidad de los resultados obtenidos en los ensayos posteriores.

El procedimiento de curado y acondicionamiento consistió principalmente en proteger las muestras con bolsas plásticas herméticas, con el objetivo de mitigar los cambios de humedad por evaporación y evitar la pérdida prematura de agua en las probetas. Esta medida buscó mantener la humedad de compactación inicial, condición indispensable para asegurar que el comportamiento del material en laboratorio reprodujera de manera adecuada las condiciones reales de colocación en campo.

Además, el sellado de las probetas permitió minimizar la influencia de factores ambientales externos, tales como variaciones de temperatura, corrientes de aire o radiación solar indirecta, que podrían acelerar el proceso de secado y alterar los resultados de los ensayos de resistencia. En algunos casos, las muestras fueron almacenadas en cámaras o espacios cerrados con temperatura y humedad controlada, siguiendo criterios similares a los empleados en estudios de suelos estabilizados y en mezclas de concreto, lo cual incrementó la homogeneidad del proceso de curado.

El tiempo de almacenamiento se ajustó a los periodos de fraguado definidos en el programa experimental (inmediatamente, 1 hora, 3 horas, 1 día, 3 días, 7 días y 28 días), de modo que las probetas se mantuvieron bajo condiciones constantes hasta alcanzar la edad de ensayo. Durante este lapso, las muestras fueron manipuladas con precaución para evitar deformaciones, fisuras o pérdidas de material, asegurando así la integridad de cada espécimen.

La finalidad de este procedimiento fue doble: por un lado, reproducir lo más fielmente posible las condiciones de obra, donde el material suelo–cemento colocado en capas mantiene su humedad durante el proceso de compactación y fraguado; y por otro, garantizar la repetitividad y validez de los resultados experimentales, reduciendo al mínimo las variaciones asociadas al manejo de las muestras.

En conclusión, el sistema de curado y almacenamiento adoptado permitió generar un entorno controlado para el desarrollo de la resistencia en las mezclas saprolito–cemento, constituyendo un aspecto clave dentro de la metodología experimental aplicada en este estudio.

### **3.4 Metodología de campo**

La metodología de campo se centró en la evaluación del comportamiento del material saprolito–cemento colocado en el núcleo de baja permeabilidad, a través de ensayos de verificación ejecutados durante la construcción del Dique de Arranque y los Recrecimientos N.º 1 y N.º 2. El rango de cemento empleado en obra varió entre 3% y 5% en volumen, de acuerdo con las condiciones de humedad natural del saprolito y los requerimientos de resistencia establecidos en las especificaciones técnicas.

#### **3.4.1 Ensayos aplicados en el sitio**

Durante la construcción del Dique de Arranque y los Recrecimientos N.º 1 y N.º 2, se ejecutaron diversos ensayos de verificación en campo y laboratorio con el objetivo de evaluar el comportamiento del material saprolito–cemento colocado en el núcleo de baja permeabilidad. Estos ensayos se realizaron en muestras obtenidas directamente en obra, con un rango de contenido de cemento entre 3% y 5% en volumen, y permitieron controlar tanto las propiedades índices como la resistencia mecánica e hidráulica del material.

- **Ensayos índices**

- Los ensayos índices efectuados en campo y laboratorio tuvieron como finalidad caracterizar las propiedades fundamentales del material colocado:
- Contenido de humedad: El saprolito compactado presentó valores en el rango de 25% a 45%, con un promedio del 33%, aproximadamente un 10% por encima del Óptimo de Compactación del Proctor Estándar.
- Gravedad específica: Se determinó un valor medio de 2.64, empleado en los cálculos de control de compactación y porcentaje de vacíos.
- Granulometría: El material se clasificó como limo de baja plasticidad con contenidos variables de arena, presentando un promedio de 64% de finos (pasante #200), con rangos entre 34% y 96%. Todas las muestras superaron el tamiz de ½".
- Límites de Atterberg: Se identificaron valores de Límite Líquido (LL) entre 29% y 54% y de Límite Plástico (LP) entre 19% y 42%, con promedios de 39% y 30%, respectivamente. El Índice de Plasticidad promedio fue de 10%, lo que corresponde a materiales de baja plasticidad.
- Mineralogía y dispersión: El análisis de difracción de rayos X de la fracción fina (<2 µm) indicó que el material está compuesto principalmente por caolinita (64%) y, en menor proporción, illita (36%). Según la norma ASTM D6572, el saprolito mostró una predisposición nula a ligera a la dispersión, lo cual es favorable para su desempeño como material de núcleo en presas de relaves.

- **Densidad in situ**

La verificación de la compactación se efectuó mediante ensayos de cono de arena, densímetro nuclear y globo de goma, dependiendo de la etapa de construcción.

- Los resultados se compararon con la densidad seca obtenida del Proctor Estándar de un punto.
- Se determinó que el 83% de los ensayos de densidad alcanzaron el 100% de la densidad máxima seca de referencia.
- En los casos en que los valores fueron inferiores, se aprobaron únicamente si el material cumplía con  $S_u \geq 50$  kPa, presentaba texturas aceptables y mostraba un esfuerzo de compactación adecuado.
- El peso unitario húmedo del saprolito con cemento osciló entre 14.3 kN/m<sup>3</sup> y 26.2 kN/m<sup>3</sup>, con un promedio de 18.2 kN/m<sup>3</sup>.

- **Resistencia al corte no drenado**

La resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ) se determinó mediante ensayos de veleta de campo conforme a la norma ASTM D2573.

- El valor promedio de  $S_u$  fue de 72 kPa, superior al promedio de 40 kPa registrado en capas sin cemento, lo que representó un incremento cercano al 85%.
- La resistencia residual se mantuvo en torno a 40 kPa.
- La sensibilidad del material (relación entre resistencia máxima y residual) osciló entre 1.0 y 4.0, con un valor medio de 1.9, lo que corresponde a una sensibilidad ligera a moderada.
- Las capas blandas o sobresaturadas que no cumplieron con el criterio mínimo de resistencia fueron retiradas y reemplazadas.

- **Ensayos de infiltración**

Con el fin de estimar la permeabilidad in situ, se realizaron pruebas de infiltración en campo siguiendo la norma ASTM D3385.

- Debido a las bajas tasas de infiltración, no se registraron cambios en el nivel de agua durante 24 horas de prueba.
- Los valores obtenidos fueron inferiores a  $1 \times 10^{-7}$  cm/s, confirmando que el sapolito-cemento colocado cumple con los criterios de baja permeabilidad exigidos para núcleos de presas.

- **Ensayos avanzados de laboratorio sobre muestras inalteradas**

De manera complementaria, se extrajeron muestras inalteradas del núcleo para la realización de ensayos especializados:

- Ensayos triaxiales (CU y UU): Se aplicaron ensayos triaxiales consolidado no drenado (ASTM D4767) y no consolidado no drenado (ASTM D2850). Se obtuvo una cohesión promedio de 70 kPa, observándose un comportamiento dúctil sin evidencias de ruptura frágil.
- Permeabilidad de pared flexible: La conductividad hidráulica se evaluó mediante ASTM D5084, registrándose valores entre  $1.9 \times 10^{-9}$  m/s y  $1.1 \times 10^{-5}$  m/s, con un promedio de  $8.9 \times 10^{-7}$  m/s. La mayoría de los resultados estuvieron por debajo del límite máximo de  $1 \times 10^{-7}$  m/s, validando la baja permeabilidad del material compactado.

- **Metodología alternativa de compactación**

Debido a que el contenido de humedad natural del sapolito era en promedio 10% superior al Óptimo de Compactación del Proctor Estándar, se implementó un esquema alternativo de control:

- Se utilizó el Proctor Estándar de un solo punto para estimar la densidad máxima seca al contenido de humedad natural.
- Se definieron criterios de aprobación alternativos, basados en el cumplimiento simultáneo de densidad seca entre 1250 y 1500 kg/m<sup>3</sup>, contenido de humedad entre 25% y 37%, y porcentaje de vacíos  $\leq 5\%$ .
- En los casos en que la densidad no alcanzó el 100% del Proctor Estándar, el relleno fue aprobado siempre que cumpliera con  $S_u \geq 50$  kPa y presentara condiciones texturales aceptables.

### **3.5 Proceso constructivo y metodologías de mezclado en campo**

#### **3.5.1 Procedimiento de extracción, transporte y colocación del material**

El presente procedimiento describe, de forma secuencial y controlada, las actividades para extraer, mezclar con cemento, transportar, colocar y compactar el saprolito destinado al núcleo de baja permeabilidad de la presa de relaves en un entorno tropical de alta pluviometría. Se aplicó cemento Portland Tipo I en rangos de 1%–6% en volumen (promedio 4,5%), con control por volumen y colocación dentro de la primera hora tras la mezcla para respetar el inicio de hidratación.

- **Extracción en Áreas de Préstamo**

- Fuentes de material: Borrow 2, Borrow 4 y Borrow 5 (dentro del embalse).
- Condición hídrica del material: humedad natural típica 30,21%–34,37% ( $\approx 10\%$  por encima del OCH del Proctor Estándar).
- Operación de corte y carguío: excavación con excavadora sobre laderas; conformación de pilas temporales según frentes activos.

- Selección y limpieza: remoción de material claramente inaceptable (saturado extremo, orgánico, grumos ajenos) antes del mezclado.
- **Mezclado con cemento (estabilización)**
  - Objetivo: mejorar trabajabilidad, resistencia y reducir susceptibilidad a lluvia/filtración.
  - Método 1 – Mezclado in situ (fase inicial de obra)
  - Extendido del saprolito en 200–300 mm de espesor.
  - Surcado con excavadora a 150–250 mm de profundidad.
  - Esparcido de cemento sobre el surco y re-mezclado con cortes transversales.
  - Rotura manual de grumos de cemento.
  - Observación operativa: método lento/ineficiente y con riesgo de heterogeneidad; se usó solo 2–3 semanas.
  - Método 2 – Mezclado previo a la colocación (método adoptado)
  - Stockpile próximo a la zona de préstamo ( $\approx$  dos cargas de camión).
  - Dosificación por conteo volumétrico (p.ej., 1 cuchara de cemento / 29 cucharas de saprolito  $\approx$  3,5% v/v).
  - Mezcla con excavadora hasta lograr homogeneidad (grumos mínimos).
  - Ventana logística: ciclo completo 30–45 min; colocar  $\leq$  1 h desde el inicio de la mezcla.
  - Nota de control: La dosificación se rigió estrictamente por volumen; cualquier ajuste se documentó en parte diaria (frente, hora, % cemento, clima).
- **Transporte**
  - Medio principal: camiones volquete ( $\approx$  12–23 m<sup>3</sup>).

- Trayecto: stock de mezcla → nivel de trabajo del núcleo, con planificación para asegurar descarga y extendido antes de 1 h desde el inicio de mezcla.
  - Buenas prácticas: cobertura/rápida rotación bajo lluvia; coordinación con frente para evitar colas y tiempos muertos.
- **Colocación y compactación**
  - Extendido: capas de 300 mm (elevación suelta) dentro del núcleo.
  - Compactación primaria: tractor con 2–4 pasadas superpuestas según humedad; apoyo con cuchara de excavadora y compactadores manuales en zonas inaccesibles.
  - Tratamiento de interfaces: planchas vibrantes de 0,5 t en contactos con filtros y terreno natural.
  - Ritmo de obra (referencial): tasa de subida del núcleo 0,15 m/d (Dique de Arranque y Recrecimiento N.º 2) y 0,10 m/d (Recrecimiento N.º 1);  $\approx 720 \text{ m}^3/\text{d}$  de colocación.
  - Verificación de homogeneidad: calicatas puntuales para revisar textura, ausencia de lentes sin mezclar y grumos de cemento.
- **Control y aseguramiento de calidad (QA/QC) en línea**
  - Tiempo de colocación: verificación de que la mezcla se colocó  $\leq 1 \text{ h}$  desde su inicio.
  - Compactación: observación del esfuerzo de compactación (cobertura y traslape de pasadas).
  - Criterios de aceptación alternativos (cuando aplique): aprobación por combinación de parámetros, incluyendo  $S_u \geq 50 \text{ kPa}$ , densidad seca

dentro de 1.250–1.500 kg/m<sup>3</sup>, humedad 25%–37%, y vacíos  $\leq 5\%$  (con base en Proctor Estándar de un punto y condiciones de humedad natural).

- Textura y superficie: nivelación para favorecer escorrentía; sellado rápido ante lluvia.

- **Observaciones operativas y contingencias**

- Pre-cemento: capas recién colocadas, bajo lluvia/filtración, presentaron mala trabajabilidad y baja resistencia, con necesidad de retirar material saturado; Su promedio observado en primeras capas sin cemento  $\approx 40$  kPa (por debajo de 50 kPa).
- Post-cemento: mejora marcada de trabajabilidad y avance; menor retrabajo por saturación.
- No conformidades típicas y corrección:
- Agrietamientos por colocar material más rígido/seco sobre más débil/saturado  $\rightarrow$  retirar y reemplazar el tramo.
- Huella de oruga con encharcamiento  $\rightarrow$  reperfilado y retiro de  $\approx 0,15$  m de relleno saturado si aplica.
- Lluvia súbita: sellar capas lo antes posible, eliminar pendientes abruptas y favorecer escorrentía controlada.

- **Seguridad, ambiente e interfaces**

- Seguridad: control de tránsito de camiones, radios de giro, taludes de trabajo y visibilidad en lluvia.
- Ambiente: manejo de escorrentías, evitar arrastre de finos, sellado oportuno; limitar huellas profundas que acumulen agua.

- Coordinación: sincronización entre préstamo–mezcla–transporte–frente; comunicación activa para preservar la ventana de 1 h.
- **Registros y trazabilidad**
  - Partes diarias: frente/ubicación, hora de mezcla y colocación, % cemento (v/v), condiciones climáticas, equipos, número de pasadas.
  - Control QA/QC asociado: densidad de campo vs. referencia, inspección visual/textural, calicatas, y verificación del criterio  $S_u \geq 50$  kPa cuando corresponda.
  - Gestión de no conformidades: registro de retiro/reemplazo, causa y acción correctiva.

### 3.5.2 Métodos de mezclado suelo–cemento

La estabilización del saprolito con cemento Portland Tipo I se implementó a partir de enero de 2019 para la construcción de la zanja de corte y del núcleo de baja permeabilidad de la presa de relaves. La dosificación de cemento varió entre 1% y 6% en volumen, con un promedio de 4,5%, ajustándose en función del contenido de humedad natural del material extraído de las áreas de préstamo. El control de la cantidad de cemento se efectuó de manera estricta por volumen, utilizando como referencia el número de cargas de la cuchara de la excavadora (p. ej., una carga de cemento por cada 29 cargas de saprolito correspondía a una mezcla del 3,5% de cemento en volumen).

- Con base en las condiciones de obra y en la necesidad de mejorar la trabajabilidad y resistencia del material en un entorno tropical de alta pluviosidad, se documentaron dos métodos principales de mezclado:
  - **Método 1 – Mezclado in situ**

- Período de uso: aplicado durante las primeras dos a tres semanas de construcción, en las etapas iniciales de colocación de la mezcla.
- Procedimiento:
- El saprolito extraído era extendido en capas de 200 a 300 mm de espesor.
- La excavadora realizaba surcos de 150 a 250 mm de profundidad, generando un patrón cruzado para facilitar la mezcla.
- El cemento se esparcía uniformemente sobre la superficie surcada y se incorporaba mediante nuevos cortes transversales con la cuchara de la excavadora.
- Los grumos de cemento se rompían manualmente antes de proceder a la compactación.
- La mezcla se compactaba con 4 a 6 pasadas del tractor, hasta alcanzar la densidad requerida.
- Observaciones: aunque este método permitió iniciar la colocación, fue considerado lento e ineficiente, con alta demanda de mano de obra y riesgo de generar áreas mal mezcladas. Su uso se limitó a la etapa inicial del proyecto.
- Método 2 – Mezclado antes de colocarlo (método alternativo)
  - Período de uso: este procedimiento reemplazó al Método 1 tras las primeras semanas de obra, debido a su mayor eficiencia y confiabilidad.
  - Procedimiento:

- El saprolito era excavado del talud en las áreas de préstamo y apilado en un área designada cercana, con capacidad para aproximadamente dos cargas de camión por ciclo.
  - Se añadía el cemento al stock de saprolito y se procedía al mezclado con la cuchara de la excavadora, asegurando una dosificación precisa basada en el número de cargas.
  - Una vez homogénea, la mezcla era transportada en camiones volquetes al frente de trabajo y colocada en capas de 300 mm de espesor.
  - Observaciones: el ciclo completo de mezclado y transporte duraba entre 30 y 45 minutos. Era esencial que el material fuese colocado en el plazo máximo de una hora desde el inicio de la mezcla, para evitar los efectos del fraguado temprano del cemento. Este método mejoró la eficiencia de construcción, redujo el tiempo de mezcla a menos de la mitad y permitió obtener un material homogéneo y uniforme, con presencia mínima de grumos de cemento.
- Consideraciones generales

La implementación de estos métodos de mezclado contribuyó a mejorar significativamente la resistencia y trabajabilidad del saprolito utilizado en el núcleo. En campo, la resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ) aumentó de un promedio inicial de 40 kPa (sin cemento) a 74 kPa con la estabilización, representando un incremento cercano al 85%. Asimismo, el relleno mostró menor susceptibilidad a la saturación por lluvia, reduciendo la necesidad de retrabajos y la eliminación de capas defectuosas.

No obstante, se destacó que el proceso de mezclado y colocación no debía ejecutarse bajo lluvia continua, ya que las condiciones de saturación podían comprometer la uniformidad y calidad del material compactado.

### **3.4.1 Metodología de compactación y criterios de aprobación**

La compactación del saprolito estabilizado con cemento fue un proceso esencial para garantizar el adecuado desempeño del núcleo de baja permeabilidad de la presa de relaves. Dadas las condiciones particulares del material saprolítico y del clima tropical húmedo del sitio, se diseñó una metodología de compactación específica acompañada de criterios de aprobación que aseguraran tanto la resistencia mecánica como la baja permeabilidad del relleno.

- **Desafío del contenido de humedad natural**

El saprolito presentó de manera consistente un contenido de humedad natural superior al Óptimo de Compactación (OCH) definido por el ensayo Standard Proctor. En promedio, la humedad natural excedió el OCH en un 10%, con valores que podían llegar a superar en 25% según el área de préstamo y la época del año. Esta condición, sumada a la alta pluviometría de la región amazónica, dificultaba la compactación, disminuía la resistencia al corte y limitaba la densificación del material.

La hidratación del cemento mejoró parcialmente la resistencia del material, pero no redujo de forma significativa el exceso de humedad respecto al OCH, lo que hizo necesario adoptar una metodología alternativa de control y aceptación distinta a la convencional.

- **Control de compactación – Proctor Estándar de un punto**

Con el fin de adaptar los procedimientos de control a las condiciones naturales del material, se empleó el Proctor Estándar en un solo punto. Este método consistió en estimar la máxima densidad seca al contenido de humedad natural, aplicando la misma energía de compactación del ensayo estándar.

- Los valores de densidad seca obtenidos oscilaron entre 1.225 kg/m<sup>3</sup> y 1.570 kg/m<sup>3</sup>, con un promedio de 1.414 kg/m<sup>3</sup>.
- En campo, la densidad del relleno se verificó mediante ensayos de cono de arena, densímetro nuclear y globo de goma. Durante los Recrecimientos N.º 1 y N.º 2 se priorizó el método del globo de goma.
- La densidad media de campo alcanzada fue equivalente al 100% del Proctor Estándar de un punto, cumpliendo con las especificaciones establecidas. El peso unitario húmedo del saprolito-cemento varió entre 14,3 kN/m<sup>3</sup> y 26,2 kN/m<sup>3</sup>, con un promedio de 18,2 kN/m<sup>3</sup>.

• **3. Criterios de aprobación alternativos**

Debido a las limitaciones impuestas por la elevada humedad natural, se estableció un rango de aprobación del material compactado basado en parámetros complementarios de resistencia y permeabilidad, además de densidad y humedad.

Los criterios fueron los siguientes:

- Resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ): valor mínimo de 50 kPa, medido mediante ensayo de veleta manual. El promedio observado en campo fue de 72 kPa, un 85% superior al valor sin cemento. Los resultados de  $S_u \geq 50$  kPa se concentraron en densidades secas entre 1.250–1.500 kg/m<sup>3</sup> y humedades entre 25–37%.
- Permeabilidad: inferior a  $1 \times 10^{-7}$  cm/s, verificada mediante pruebas de infiltración en campo (ASTM D3385). Los resultados confirmaron

tasas menores al límite establecido, en el mismo rango de densidad y humedad definido por la resistencia.

- Densidad de compactación: el material debía alcanzar el 100% de la densidad seca máxima estimada con el Proctor de un punto. En los casos en que no se alcanzaba este valor, el material fue aprobado si cumplía simultáneamente con  $S_u \geq 50$  kPa, esfuerzo de compactación adecuado y textura aceptable.
- Porcentaje de vacíos: rango aceptable  $\leq 5\%$ , intersecado con los límites de densidad y humedad antes descritos.
- Textura del relleno: se esperaba una estructura homogénea y densa, sin lentes de material suelto ni grumos de cemento. Las calicatas de control confirmaban la uniformidad de la mezcla.

- **Técnicas y equipos de compactación**

La compactación del material se llevó a cabo con los siguientes equipos y procedimientos:

Colocación en capas de 300 mm sueltos dentro del núcleo.

- Compactación primaria mediante tractor de oruga, con un mínimo de 2 a 4 pasadas superpuestas dependiendo de la humedad del relleno.
- En zonas de difícil acceso se emplearon la cuchara de la excavadora y compactadores manuales.
- En interfaces críticas, como contacto con filtros y fundación, se utilizaron planchas compactadoras de 0,5 t para asegurar una densificación adecuada.

- **5. Observaciones adicionales y recomendaciones**

- Se registraron agrietamientos localizados cuando se colocó saprolito más seco y rígido sobre capas más blandas y saturadas, lo que obligó a la remoción y reemplazo del material afectado.
- Las huellas irregulares de las orugas del tractor favorecieron el estancamiento de agua de lluvia, causando saturación en sectores puntuales que requirieron el retiro de hasta 0,15 m de relleno.
- Se recomendó sellar rápidamente cada capa expuesta al inicio de la lluvia, nivelar la superficie para favorecer la escorrentía y evitar pendientes abruptas que pudieran inducir erosión.
- Se enfatizó la necesidad de establecer un umbral máximo de precipitación a partir del cual debía suspenderse la colocación de material.



## **Capítulo 4.**

### **ANÁLISIS DE DATOS**

#### **4.1 Resultados de la evaluación en laboratorio**

##### **4.1.1 Condición inicial del saprolito sin adición de cemento**

El análisis del saprolito en su estado natural permitió identificar limitaciones críticas para su utilización directa como material de núcleo en la presa de relaves. Las características físicas y mecánicas iniciales evidenciaron la necesidad de introducir un proceso de estabilización con cemento, con el fin de cumplir los requisitos técnicos de resistencia y compactación del proyecto.

- **Densidad húmeda en campo**

El saprolito proveniente de las áreas de préstamo (Borrow 2, Borrow 4 y Borrow 5) se caracterizó por presentar un alto contenido de humedad natural, con valores comprendidos entre 30,21% y 34,37%, equivalentes a un promedio 10% superior al Contenido Óptimo de Humedad (OCH) definido en el ensayo Proctor Estándar.

Esta condición de humedad excesiva se vio agravada por el clima tropical húmedo de la región amazónica, donde las precipitaciones sostenidas durante todo el año impiden periodos de secado natural. Como consecuencia:

- La trabajabilidad del material fue reducida, dificultando su adecuada conformación.
- La densidad de compactación alcanzada en campo fue inferior a la requerida, incluso con esfuerzos de compactación elevados.
- El retrabajo del material sin adición de cemento resultaba contraproducente, ya que liberaba agua atrapada en la estructura

mineral del saprolito, aumentando aún más el porcentaje de humedad.

En conjunto, estas características explican la baja eficiencia del saprolito natural para ser compactado en condiciones de obra, lo que justificó la búsqueda de una alternativa de estabilización.

- **Resistencia al corte sin cemento**

Los ensayos realizados sobre las primeras cuatro capas de saprolito (espesor total 1,2 m) colocadas sin adición de cemento arrojaron valores de resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ) entre 26 kPa y 68 kPa, con un promedio de 40 kPa. Este valor resultó inferior al umbral mínimo de 50 kPa establecido en las especificaciones técnicas del proyecto.

Las consecuencias inmediatas fueron:

- Progreso lento de la construcción, debido a la necesidad de reparar capas con fallas por resistencia insuficiente.
- Mal desempeño bajo condiciones de lluvia y filtración, donde el tránsito de maquinaria generaba saturación, sobrecompactación del relleno subyacente y pérdida de resistencia.
- En varios casos, fue necesario retirar material débil y saturado, generando retrasos y mayores costos de operación.

En cuanto a la resistencia a la compresión simple (UCS), aunque el saprolito natural mostraba un leve incremento con el tiempo, no alcanzaba el valor mínimo de  $q_u \geq 100$  kPa recomendado para la liberación de capas. Esto ratifica que el material en su estado natural carecía de la capacidad portante suficiente para cumplir las exigencias del diseño.

Conclusión parcial

Las condiciones iniciales del saprolito —alto contenido de humedad, baja densidad alcanzable y resistencias mecánicas por debajo de los valores especificados— demostraron que su uso sin aditivos no era viable para la construcción del núcleo de baja permeabilidad. Ante este escenario, se recomendó la mezcla con cemento Portland Tipo I en proporciones entre 3% y 4,5% en volumen, como medida necesaria para incrementar la resistencia al corte, mejorar la trabajabilidad y reducir la sensibilidad a la saturación, garantizando así la continuidad y seguridad del proceso constructivo.

*Tabla 2.- Áreas de préstamo de saprolito y resultados de caracterización geotécnica*

| Área de Préstamo | Contenido de Humedad (%) | Grava (%) | Arena (%) | Finos (%) | Límite Plástico (LP) | Límite Líquido (LL) | Índice de Plasticidad (IP) | Clasificación (USCS)                     | Mineralogía Principal    | Su Inicial (kPa) | Observaciones                             |
|------------------|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------------------|---------------------|----------------------------|--|--------------------------|------------------|---|
| Borrow 2         | 31.06                    | 0.4       | 42.4      | 57.2      | 27                   | 37                  | 10                         | ML (limo arenoso de baja plasticidad)    | Caolinita 64% Illita 36% | 26-68 (prom. 40) | Material húmedo, trabajabilidad reducida  |
| Borrow 4         | 34.37                    | 0.1       | 36.2      | 63.7      | 28                   | 38                  | 10                         | CL (arcilla arenosa de baja plasticidad) | Caolinita 64% Illita 36% | 26-68 (prom. 40) | Humedad natural más alta, baja densidad   |
| Borrow 5         | 30.21                    | 0.4       | 41.1      | 58.6      | 27                   | 37                  | 10                         | ML (limo arenoso de baja plasticidad)    | Caolinita 64% Illita 36% | 26-68 (prom. 40) | Condición húmeda constante, no dispersivo |

#### 4.1.2 Efecto de la adición de cemento y el tiempo de fraguado

La incorporación de cemento Portland Tipo I al saprolito se evaluó en laboratorio con el propósito de analizar su efecto en la resistencia mecánica y en las propiedades índice del material. Se realizaron ensayos con diferentes relaciones de cemento (0,7%, 1,5%, 2,3%, 3,0%, 4,5% y 6,0% en volumen total de saprolito), considerando distintos periodos de fraguado: inmediatamente, a 1 hora, a 3 horas, a 1 día, a 3 días, a 7 días y a 28 días.

Los resultados demostraron que la adición de cemento, junto con el tiempo de fraguado, influyó significativamente en el incremento de la resistencia al

corte y a la compresión del material, aunque no modificó de manera relevante su contenido de humedad natural.

- **Contenido de humedad**

El contenido de humedad del saprolito con cemento mostró una variación mínima a lo largo del tiempo. A los 7 días de fraguado, la disminución del contenido de humedad natural no superó el 2%, lo que confirma que el proceso de hidratación del cemento no fue suficiente para reducir de manera sustancial el exceso de agua en el material. Este comportamiento sugiere que la mejora de resistencia observada responde principalmente a los procesos de cementación y no a cambios en la humedad del suelo.

- **Límites de Atterberg**

Los ensayos de Atterberg (ASTM 4318) evidenciaron que el Índice de Plasticidad (IP) inicial del saprolito sin cemento era de 18, valor que disminuyó a un rango de 8 a 11 con la adición de cemento (1%, 2%, 3%, 4% y 6%). Esta reducción se explicó principalmente por el incremento del Límite Plástico (LP), mientras que el Límite Líquido (LL) no presentó cambios significativos. En consecuencia, las mezclas saprolito–cemento se clasificaron como arcillas de baja plasticidad (CL) y limos de baja plasticidad (ML), reflejando un comportamiento más favorable para su utilización en rellenos de baja permeabilidad.

- **Granulometría, hidrometría y dispersión**

El análisis granulométrico (ASTM D6913 y D7928) mostró que el material presenta un promedio del 55% de finos (pasante #200), confirmando su clasificación como un suelo fino. En cuanto a la dispersión (ASTM D6572), el material se clasificó como Grado 1 no dispersivo, lo que indica baja

susceptibilidad a la erosión interna. Estos resultados son consistentes con la mineralogía del saprolito, compuesta mayoritariamente por caolinita (64%) y en menor proporción por illita (36%).

- **Resistencia al corte no drenado (veleta manual)**

Los ensayos de veleta (ASTM D2573) mostraron la influencia combinada de la humedad inicial y la cantidad de cemento:

- 30% de humedad natural: Se requirió un mínimo de 3% de cemento para superar los 50 kPa de resistencia una hora después del mezclado.
- 33% de humedad natural: El 2,3% de cemento fue suficiente para alcanzar el umbral de 50 kPa tras una hora.
- 36% de humedad natural: Fue necesario un 4,5% de cemento, alcanzando la resistencia requerida recién a las 3 horas.

En términos de evolución temporal, la resistencia al corte no drenado mostró incrementos de 170% a 600% entre la primera hora y las 24 horas de fraguado. A las 24 horas ya se había alcanzado entre el 60% y el 90% de la resistencia total observada a los 7 días. Cabe señalar que las mezclas con 6% de cemento resultaron tan rígidas entre los 3 y 7 días que no fue posible ejecutar el ensayo de veleta.

- **Esfuerzo de compresión simple no confinada (UCS)**

Los ensayos de compresión simple (ASTM D2166) confirmaron el efecto positivo del cemento sobre la resistencia. Se adoptó un valor mínimo de referencia de 100 kPa para la compresión simple ( $q_u$ ), equivalente a una resistencia al corte ( $S_u$ ) de 50 kPa.

- Material sin cemento: No alcanzó el valor mínimo de 100 kPa, incluso tras periodos prolongados de fraguado.

- 30% de humedad natural: Con 3% de cemento, los resultados superaron los 100 kPa una hora después del mezclado.
- 33% de humedad natural: Solo la mezcla con 2,3% de cemento alcanzó el valor mínimo a los 7 días.
- 36% de humedad natural: Se requirió un 4,5% de cemento para superar los 100 kPa después de tres horas.

En general, la resistencia calculada a partir de los ensayos UCS aumentó entre 100% y 800% durante las primeras 24 horas de fraguado, con mayor efecto en las mezclas de mayor dosificación de cemento. Aproximadamente del 71% al 95% de la resistencia total a los 7 días ya se había alcanzado a las 24 horas. Además, las muestras con menor contenido de humedad desarrollaron mayores resistencias con menores cantidades de cemento, mientras que aquellas con mayor humedad requirieron mayores dosificaciones para lograr resultados adecuados.

Tabla 3. Propiedades mecánicas clave: saprolito natural vs. saprolito-cemento (comparativo)-

| Propiedad                                  | Saprolito sin cemento (inicial) | Saprolito-cemento (3-6% vol.) | Criterio de diseño / aceptación   | Cumple                              | Ensayo / Sección                       |
|--|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--|
| Su (kPa) –veleta manual                    | 26-68 (40 prom.)                | 72 prom. (38-200)             | ≥ 50 kPa                          | <input checked="" type="checkbox"/> | ASTM D2573 – 4.1.1 / 4.2.2             |
| qu (kPa) –compresión simple                | < 100                           | 300-800 (24 h típ.)           | ≥ 100 kPa                         | <input checked="" type="checkbox"/> | ASTM D2166 – 4.1.2                     |
| IP   | 18                              | 8-11                          | Baja plasticidad (CL/ML) deseable | <input checked="" type="checkbox"/> | ASTM D4318 – 4.1.2                     |
| Humedad de colocación w (%)                | 31-36                           | 25-45 (32.5 prom.)            | – (control por rango operativo)   | –                                   | ASTM D2216 – 4.2.1                     |
| Densidad seca in situ (kg/m <sup>3</sup> ) | – (insuficiente)                | 1,406 prom. (1,159-1,837)     | ≥ 100% Proctor 1-punto            | <input checked="" type="checkbox"/> | Proctor 1-punto / campo – 4.4.1, 4.2.2 |

- **Relación deformación unitaria – esfuerzo de compresión**

El análisis de la relación entre deformación unitaria y esfuerzo de compresión (ASTM D2166) se evaluó con especial atención a los 7 días de fraguado, dado

que hacia los 28 días no se evidenciaron cambios significativos adicionales. Los resultados mostraron que, a mayor contenido de cemento, el material incrementó tanto su resistencia como su rigidez, adoptando un comportamiento más frágil.

No obstante, se advirtió que el modo de falla de una mezcla suelo–cemento difiere del obtenido en un UCS convencional, por lo que no es posible concluir de manera definitiva que un mayor contenido de cemento implique necesariamente un material más frágil. Para una caracterización más precisa, se tomaron muestras inalteradas del núcleo destinadas a ensayos triaxiales.

Tabla 4.- Resumen de ensayos de laboratorio y campo del material saprolito–cemento colocado en el núcleo de baja permeabilidad

| Ensayo / Propiedad                  | Promedio                             | Mínimo | Máximo |
|-------------------------------------|--------------------------------------|--------|--------|
| <b>Contenido de humedad (%)</b>     | 32.5                                 | 25.5   | 45.4   |
| <b>Gravedad específica</b>          | 2.64                                 | 2.47   | 2.75   |
| <b>Granulometría</b>                |                                      |        |        |
| Tamaño máximo (mm)                  | –                                    | –      | 38.1   |
| Grava (%)                           | 0.5                                  | 0.1    | 10.5   |
| Arena (%)                           | 5.6                                  | 0.1    | 10.8   |
| Finos (%)                           | 63.9                                 | 39.6   | 88.9   |
| <b>Límites de Atterberg</b>         |                                      |        |        |
| Límite Plástico (LP) (%)            | 30.3                                 | 19     | 42.3   |
| Límite Líquido (LL) (%)             | 39.3                                 | 28.5   | 53.6   |
| Índice de Plasticidad (IP)          | 9                                    | 2      | 23     |
| <b>Densidad in situ</b>             |                                      |        |        |
| Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )  | <b>1,406</b>                         | 1,159  | 1,837  |
| Contenido de humedad in situ (%)    | 32.5                                 | 25.5   | 45.4   |
| Compactación relativa (%)           | <b>100</b>                           | 94     | 105    |
| <b>Resistencia no drenada (Su)</b>  |                                      |        |        |
| Pico (kPa)                          | <b>72</b>                            | 38     | 200    |
| Remoldeado (kPa)                    | <b>40</b>                            | 10     | 120    |
| Sensibilidad                        | 1.9                                  | 1.4    | 4      |
| <b>Infiltración / Permeabilidad</b> |                                      |        |        |
| Tasa de infiltración (m/s)          | <b>&lt; 1 × 10<sup>-7</sup> cm/s</b> | –      | –      |

## **4.2 Resultados de la evaluación en campo**

### **4.2.1 Propiedades índices del material colocado**

La caracterización de las propiedades índice del material saprolito-cemento colocado en el núcleo de baja permeabilidad constituye un aspecto fundamental para comprender su comportamiento en obra. Durante la construcción del Dique de Arranque y los Recrecimientos N°1 y N°2, se emplearon mezclas de saprolito con un rango de cemento entre 3% y 5% en volumen, extraídas de las áreas de préstamo Borrow 2, Borrow 4 y Borrow 5.

Los resultados que se presentan a continuación provienen de ensayos de campo y de laboratorio realizados en muestras representativas del material colocado, los cuales permitieron establecer su clasificación geotécnica y verificar la consistencia con los requisitos de diseño.

- **Contenido de humedad**

El material de relleno se caracterizó por presentar un contenido de humedad natural entre 25% y 45%, con un promedio de 33%, valor aproximadamente 10% superior al Contenido Óptimo de Humedad (OCH) del ensayo Proctor Estándar.

Los datos obtenidos in situ indicaron un promedio de 32,5%, con valores extremos de 25,5% (mínimo) y 45,4% (máximo). Al comparar entre áreas de préstamo, se observó que el Borrow 2 (32,3%) y Borrow 5 (30,21%) fueron ligeramente más secos que el Borrow 4, aunque ambos mantuvieron humedades naturales entre un 7% y 10% por encima del OCH, lo que evidencia la dificultad de trabajar con este material en condiciones tropicales.

- **Gravedad específica**

El saprolito colocado mostró una **gravedad específica promedio de 2,64**, con un rango entre **2,47 y 2,75**. Estos valores se encuentran dentro de los rangos esperados para suelos residuales derivados de roca ígnea o metamórfica, confirmando la consistencia del material empleado en los tres sectores de préstamo.

- **Granulometría**

El material colocado fue descrito como relativamente homogéneo, predominando su clasificación como limo de baja plasticidad con contenido variable de arena.

- El contenido de finos (pasante #200) tuvo un promedio de 63,9%, con rangos amplios entre 34% y 96%, lo que refleja variabilidad entre áreas de préstamo y capas colocadas.
- El contenido de arena varió entre 1% y 36%, con un promedio de 5,6%.
- El contenido de grava fue mínimo, con un promedio de 0,5% y valores entre 0,1% y 10,5%.
- Todas las muestras pasaron el tamiz estándar de ½", confirmando que se trata de un material predominantemente fino con partículas menores a 38,1 mm.

Estos resultados ubican al saprolito dentro de la clasificación SUCS como suelos finos con bajo contenido de fracción gruesa, adecuados para conformar un núcleo de baja permeabilidad.

- **Límites de Atterberg**

Los ensayos de límites de consistencia permitieron establecer que:

- El Límite Líquido (LL) varió entre 29% y 54%, con un promedio de 39,3%.
- El Límite Plástico (LP) estuvo en un rango de 19% a 42%, con un promedio de 30,3%.
- El Índice de Plasticidad (IP) tuvo un valor promedio de 9%, con un rango entre 2% y 23%.

De acuerdo con la Carta de Plasticidad, estos resultados ubican al material principalmente en las clasificaciones CL (arcilla de baja plasticidad) y ML (limo de baja plasticidad), lo cual es consistente con la descripción geotécnica de las áreas de préstamo.

- **Mineralogía y dispersión**

El análisis mineralógico mediante difracción de rayos X ( $<2 \mu\text{m}$ ) confirmó que la fracción arcillosa del saprolito está compuesta principalmente por caolinita (64%) y en menor proporción por illita (36%). Esta mineralogía explica la baja plasticidad observada y la limitada capacidad de expansión del material.

Por su parte, las pruebas de dispersión (ASTM D6572) indicaron que el saprolito se clasifica como un material con ninguna a ligera predisposición a la dispersión, lo cual constituye una condición favorable para su utilización en el núcleo, ya que reduce el riesgo de erosión interna.

#### **4.2.2 Propiedades de resistencia y compactación del material colocado**

La caracterización de las propiedades de resistencia y compactación del saprolito-cemento colocado en el núcleo de baja permeabilidad permitió verificar la efectividad

de la estabilización con cemento y el cumplimiento de los parámetros de control establecidos en el diseño. Durante la construcción del Dique de Arranque y los Recrecimientos N°1 y N°2, se emplearon mezclas de saprolito con un contenido de 3% a 5% de cemento en volumen, cuyos resultados de desempeño se describen a continuación.

- **Densidad in situ y compactación**

La densidad in situ del relleno de Zona 1 fue verificada mediante los métodos de cono de arena, densímetro nuclear y globo de goma. Durante los Recrecimientos N°1 y N°2, se priorizó el uso del ensayo de globo de goma, dada la mayor precisión que ofrecía bajo las condiciones húmedas del sitio.

Todos los resultados fueron comparados con la densidad seca Proctor Estándar de un punto, adoptado como referencia debido a que el contenido de humedad natural del saprolito se encontraba, en promedio, un 10% por encima del OCH del Proctor Estándar de 5 puntos, condición que no podía ser corregida por la hidratación del cemento.

Los resultados indicaron:

- Una densidad seca in situ promedio de 1,406 kg/m<sup>3</sup>, con valores entre 1,159 kg/m<sup>3</sup> y 1,837 kg/m<sup>3</sup>.
- Una compactación relativa equivalente al 100% del Proctor Estándar de un punto, cumpliendo con los requisitos especificados.
- El 83% de los ensayos de densidad alcanzaron este valor de referencia.

En los casos en que la densidad fue menor al 100%, se aprobaron los rellenos siempre que se verificara una  $S_u \geq 50$  kPa, un esfuerzo de compactación adecuado y una textura homogénea.

El peso unitario húmedo del material osciló entre 14.3 kN/m<sup>3</sup> y 26.2 kN/m<sup>3</sup>, con un promedio de 18.2 kN/m<sup>3</sup>, mientras que el contenido de humedad in situ promedio fue de 32.5%. Las inspecciones de campo confirmaron una textura densa, homogénea y bien tejida, en contraste con los rellenos blandos o sobresaturados, los cuales fueron rechazados.

- **Resistencia al corte no drenado (veleta de corte)**

El promedio de resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ) obtenido en campo mediante ensayos de veleta de corte fue de 72 kPa, valor que representa un incremento del 85% respecto al promedio inicial de 40 kPa observado en capas sin cemento.

- El valor residual de  $S_u$  fue de 40 kPa.
- La sensibilidad del relleno (relación entre resistencia máxima y residual) osciló entre 1.0 y 4.0, con un promedio de 1.9, lo que corresponde a una sensibilidad ligera a moderada.
- Los resultados de la veleta fueron fundamentales para aprobar y liberar capas, de acuerdo con la especificación técnica que establecía un mínimo de 50 kPa.

- **Infiltración y permeabilidad**

Las pruebas de infiltración en campo (ASTM D3385) no lograron obtener resultados precisos, ya que no se observaron cambios en el nivel de agua durante 24 horas, confirmando las bajas tasas de infiltración del material. A pesar de ello, se concluyó que las tasas eran menores a  $1 \times 10^{-7}$  cm/s.

En laboratorio, los ensayos de permeabilidad de pared flexible (ASTM D5084) realizados en muestras inalteradas confirmaron que:

- La mayoría de los valores se encontraban por debajo del límite de  $1 \times 10^{-7}$  m/s.
- Los resultados oscilaron entre  $1.9 \times 10^{-9}$  m/s y  $1.1 \times 10^{-5}$  m/s, con un promedio de  $8.9 \times 10^{-7}$  m/s.

Estos valores evidencian que el núcleo de saprolito-cemento presenta una conductividad hidráulica adecuada para un material de baja permeabilidad, favoreciendo el control de filtraciones y garantizando la estabilidad hidráulica de la presa.

- **Ensayos avanzados de laboratorio (muestras inalteradas de campo)**

Con el fin de validar las propiedades de diseño y estudiar los efectos de la estabilización con cemento, se realizaron ensayos avanzados en muestras inalteradas tomadas directamente del núcleo.

- Ensayos triaxiales (CU y UU): Los resultados de los ensayos consolidado no drenado (CU) (ASTM D4767) y no consolidado no drenado (UU) (ASTM D2850) mostraron una cohesión promedio de 70 kPa. Las curvas esfuerzo-deformación confirmaron que el material presentó un comportamiento dúctil y constante, sin evidencia de fragilidad. Esto indica que los bajos porcentajes de cemento utilizados (3% a 5%) mejoraron la resistencia sin generar una pérdida de ductilidad en el núcleo.
- Permeabilidad de pared flexible: Estos ensayos confirmaron los resultados previamente mencionados, evidenciando que el saprolito-

cemento cumple con los parámetros de permeabilidad menores a  $1 \times 10^{-7}$  m/s, condición indispensable para el desempeño de un núcleo impermeable.

Tabla 5.- Propiedades físico-mecánicas del saprolito-cemento (ensayos de laboratorio y campo)

| Propiedad / Ensayo                      | Unidad            | Rango observado | Promedio | Requisito de diseño | Cumple                              |
|---|-------------------|-----------------|----------|---------------------|-------------------------------------|
| Contenido de humedad natural            | %                 | 25.5 – 45.4     | 32.5     | 25 – 37             | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Densidad seca in situ                   | kg/m <sup>3</sup> | 1,159 – 1,837   | 1406     | ≥ 1,250             | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Índice de plasticidad (IP)              | -                 | 8 – 11          | 9        | ≤ 15                | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Resistencia al corte no drenado (Su)    | kPa               | 38 – 200        | 72       | ≥ 50                | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Resistencia a la compresión simple (qu) | kPa               | 100 – 800       | > 100    | ≥ 100               | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Tasa de incremento de Su en 24h         | %                 | 170 – 600       | 385      | —                   | —                                   |
| Sensibilidad (Su_pico / Su_remoldeado)  | -                 | 1.4 – 4.0       | 1.9      | ≤ 5                 | <input checked="" type="checkbox"/> |

### 4.2.3 Infiltración y permeabilidad

La evaluación de la infiltración y permeabilidad del saprolito-cemento colocado en el núcleo de baja permeabilidad constituye un aspecto fundamental para verificar su desempeño como barrera hidráulica. Los resultados obtenidos en pruebas de campo y de laboratorio demuestran que el material cumplió con los requisitos de diseño en términos de baja conductividad hidráulica, garantizando así la seguridad hidráulica de la presa de relaves.

- **Pruebas de infiltración en campo**

Las pruebas de infiltración fueron realizadas en la Zona 1 de la presa conforme a la norma ASTM D3385. Sin embargo, debido a las muy bajas tasas de infiltración del material, las pruebas no pudieron entregar mediciones precisas.

Durante las 24 horas de duración de los ensayos, no se observaron cambios en el nivel de agua, lo cual confirma la baja permeabilidad del saprolito-cemento. Aunque no se obtuvieron valores exactos, los resultados permitieron inferir que las tasas de infiltración eran menores a  $1 \times 10^{-7}$  cm/s,

cumpliendo con las especificaciones de diseño para un núcleo de baja permeabilidad.

- **Pruebas de permeabilidad de pared flexible en laboratorio (muestras de campo)**

Para complementar los ensayos de campo, se realizaron pruebas de permeabilidad de pared flexible (ASTM D5084) en laboratorio sobre muestras obtenidas del núcleo.

Los resultados mostraron que:

- La mayoría de los valores de conductividad hidráulica estuvieron por debajo del límite de  $1 \times 10^{-7}$  m/s establecido en las especificaciones.
- Los resultados oscilaron entre  $1.9 \times 10^{-9}$  m/s y  $1.1 \times 10^{-5}$  m/s, con un valor medio de  $8.9 \times 10^{-7}$  m/s.
- No se observaron diferencias significativas en la permeabilidad al variar el contenido de cemento dentro del rango de 3% a 5% en volumen.
- Los valores de permeabilidad fueron incluso menores a los considerados en el diseño, lo que implica que el núcleo presenta una mayor pérdida de carga y una menor tasa de infiltración real de la asumida inicialmente.

- **Correlación de permeabilidad con criterios de compactación y humedad**

El análisis de correlación entre los resultados de permeabilidad, el contenido de humedad y la densidad seca de los rellenos permitió identificar un área de aprobación que concentra la mayoría de los resultados aceptables.

Esta área está delimitada por los siguientes rangos:

- Densidad seca: entre 1250 kg/m<sup>3</sup> y 1500 kg/m<sup>3</sup>.
- Contenido de humedad: entre 25% y 37%.

Todos los puntos de datos de permeabilidad obtenidos durante la construcción del Dique de Arranque y los Recrecimientos N°1 y N°2 se ubicaron dentro de esta área de aprobación, lo que confirma la efectividad de los procedimientos de compactación y de control de humedad implementados en campo para lograr la baja permeabilidad requerida.

Tabla 6.- Comparación del desempeño del saprolito-cemento con especificaciones de

| Parámetro evaluado                   | Valor promedio obtenido  | Especificación CDA/ICOLD          | Cumplimiento                        | Observación técnica   |
|--------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|---|
| Resistencia al corte no drenado (Su) | 72 kPa                   | ≥ 50 kPa                          | <input checked="" type="checkbox"/> | Cumple ampliamente los requisitos de estabilidad del núcleo.  |
| Permeabilidad (k)                    | < 1×10 <sup>-7</sup> m/s | ≤ 1×10 <sup>-7</sup> m/s          | <input checked="" type="checkbox"/> | Verificada en laboratorio y campo, indica baja permeabilidad. |
| Compactación relativa                | 1                        | ≥ 95%                             | <input checked="" type="checkbox"/> | Promedio alcanzado en el Proctor Estándar de un punto.        |
| Comportamiento mecánico              | Dúctil                   | Dúctil deseado                    | <input checked="" type="checkbox"/> | Confirmado por ensayos triaxiales inalterados.                |
| Fragilidad por exceso de cemento     | No significativa         | No debe presentar fractura frágil | <input checked="" type="checkbox"/> | Rango 3-6% mantiene cohesión sin fragilización.               |

#### 4.2.4 Ensayos avanzados de laboratorio en muestras inalteradas de campo

Durante la etapa de construcción, se tomaron muestras inalteradas de la Zona 1 (saprolito estabilizado con cemento) con el fin de realizar ensayos avanzados de laboratorio. El propósito fue confirmar las propiedades de diseño asumidas e investigar el efecto del cemento adicionado en el desempeño del material de relleno utilizado en el núcleo de baja permeabilidad de la presa de relaves.

- **Ensayos triaxiales**

Se realizaron dos tipos de pruebas triaxiales:

- Consolidado no drenado (CU), de acuerdo con la norma ASTM D4767.
- No consolidado no drenado (UU), conforme a la norma ASTM D2850.

Estos ensayos permitieron evaluar el comportamiento mecánico del saprolito-cemento compactado, proporcionando información clave sobre la resistencia no drenada pico ( $S_u/\sigma_v'$ ) y la cohesión del material.

- **Resultados principales:**

- Las envolventes de esfuerzos mostraron una cohesión promedio de aproximadamente 70 kPa.
- Las curvas de deformación axial vs. esfuerzo desviador no evidenciaron un comportamiento frágil.
- Por el contrario, el material mostró un comportamiento dúctil constante, lo cual refleja la capacidad del saprolito-cemento de mantener deformaciones sin pérdida abrupta de resistencia.

Este hallazgo es relevante, ya que indica que el bajo porcentaje de cemento utilizado no indujo fragilidad en el material, manteniendo la ductilidad característica del saprolito y favoreciendo la disipación de presiones de poro, aspecto crítico para la estabilidad de un núcleo de baja permeabilidad.

- **Permeabilidad de pared flexible**

La conductividad hidráulica del saprolito-cemento fue evaluada mediante el ensayo de permeabilidad de pared flexible, siguiendo la norma ASTM D5084.

- **Resultados principales:**

- La mayoría de los valores de permeabilidad estuvieron por debajo del límite de  $1 \times 10^{-7}$  m/s, establecido como criterio de diseño.

- Los valores oscilaron entre  $1.9 \times 10^{-9}$  m/s y  $1.1 \times 10^{-5}$  m/s, con una media de  $8.9 \times 10^{-7}$  m/s.
- No se identificaron diferencias significativas entre los distintos contenidos de cemento ensayados, lo que sugiere que la variación del aditivo no tuvo un impacto sustancial en la permeabilidad.
- **Implicaciones:**
  - Los valores obtenidos resultaron inferiores a los previstos en el diseño, lo cual implica que el núcleo construido presenta una pérdida de carga mayor y, por ende, una menor tasa de infiltración efectiva de la considerada inicialmente.
  - La relación entre la conductividad hidráulica y la densidad del material colocado, confirmando la consistencia de los resultados.

### **4.3 Observaciones de campo y desempeño constructivo**

#### **4.3.1 Observaciones iniciales sin cemento**

Las primeras observaciones en campo durante la construcción de la presa de relaves evidenciaron el comportamiento deficiente del saprolito en su estado natural, antes de la implementación del cemento como aditivo estabilizador. Estas condiciones iniciales, junto con las particularidades climáticas del entorno amazónico, resaltaron las limitaciones de este material y justificaron la necesidad de recurrir a un proceso de estabilización mecánica.

- **Desafíos intrínsecos del saprolito en el entorno tropical**

El saprolito, principal material empleado en el núcleo de baja permeabilidad, presentó desde el inicio un alto contenido de humedad natural, situado entre un 10% y un 25% por encima del Contenido Óptimo de Humedad (OCH) del ensayo Proctor Estándar. En este proyecto, el promedio fue un 10% superior al OCH, lo cual afectó significativamente su desempeño.

Esta condición natural se tradujo en:

- Baja trabajabilidad, dificultando la manipulación y conformación del material.
- Menor resistencia al corte, con valores insuficientes para cumplir las especificaciones técnicas.
- Densidad de compactación reducida, aun cuando se aplicaban los métodos constructivos previstos.

El problema se agravaba en un entorno de selva amazónica con lluvias sostenidas durante todo el año, sin una estación seca definida. Bajo estas circunstancias, el exceso de humedad impedía alcanzar los niveles de compactación adecuados, comprometiendo la estabilidad inicial del núcleo. Adicionalmente, el retrabajo del saprolito liberaba agua atrapada en la matriz del suelo meteorizado, lo que incrementaba aún más la humedad y disminuía la trabajabilidad del material.

- **Observaciones directas y problemas de desempeño en campo**

Durante la fase inicial, las inspecciones de campo mostraron que el tránsito de maquinaria pesada (tractores y excavadoras) sobre las capas recién colocadas generaba condiciones adversas. El problema era más crítico

en zonas con presencia de filtraciones y durante los eventos de precipitación intensa, lo que provocaba:

- Saturación y sobrecompactación de las capas subyacentes.
- Mala trabajabilidad del relleno.
- Reducción de la resistencia efectiva del material, lo que obligaba a remover secciones saturadas y reemplazarlas.

En particular, se observó que la filtración de agua subterránea en los taludes de excavación de la zanja de corte (norte y oeste) deterioraba el relleno colocado, impidiendo el cumplimiento de los requisitos de densidad, textura y resistencia. Como medida temporal, se intentó proteger las capas con plásticos para reducir su saturación Figura 2.

*Figura 10.- protección con plásticos contra lluvia y construcción de drenes perimetrales para protección*



- **Resultados de resistencia sin cemento**

Los ensayos de laboratorio confirmaron el comportamiento deficiente del saprolito en estado natural:

- Resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ): Las primeras cuatro capas (equivalentes a 1.2 m de espesor) mostraron valores entre 26 kPa y 68 kPa, con un promedio de 40 kPa. Este valor promedio estaba por debajo de la resistencia mínima requerida de 50 kPa.
- Resistencia a la compresión simple (UCS): Aunque se evidenció un incremento gradual de la resistencia con el tiempo, los valores obtenidos no alcanzaron el mínimo recomendado de  $q_u > 100$  kPa.

Estos resultados confirmaron que, en su condición natural, el saprolito no era capaz de cumplir los criterios de resistencia estipulados en las especificaciones técnicas.

- **Consecuencias y la decisión de estabilización**

El bajo desempeño del saprolito sin cemento tuvo varias consecuencias prácticas:

- El avance de la construcción fue lento, debido a la necesidad de corregir y retirar capas que no cumplían con los requisitos.
- Se produjeron fallas en la conformación del núcleo, lo que exigió intervenciones adicionales y retrabajos.
- El cronograma de obra se vio afectado por la necesidad de reparar o sustituir capas con baja resistencia.

Ante estas limitaciones, se tomó la decisión de implementar la estabilización del saprolito mediante la adición de cemento Portland Tipo I, en proporciones de 3% a 4.5% en volumen. Esta medida fue considerada esencial para:

- Mejorar la trabajabilidad del material.

- Reducir la sensibilidad a la saturación por agua de lluvia o filtraciones.
- Asegurar el cumplimiento de los parámetros de resistencia al corte y compresión requeridos para la construcción segura y eficiente del núcleo.

#### **4.3.2 Desempeño con la adición de cemento**

La incorporación de cemento como aditivo en el saprolito representó un punto de inflexión en el desempeño constructivo del núcleo de baja permeabilidad, permitiendo superar las limitaciones observadas en el material sin tratamiento. Esta decisión fue fundamental para mejorar la trabajabilidad, aumentar la resistencia inicial y garantizar la continuidad del proyecto bajo condiciones climáticas adversas.

- **Mejora en la trabajabilidad y eficiencia constructiva**

La adición de cemento Portland Tipo I mejoró de manera significativa la trabajabilidad del saprolito, reduciendo su susceptibilidad a la humedad y la precipitación.

- La hidratación del cemento favoreció un mejor comportamiento inicial del material, lo que se tradujo en un avance más eficiente de la construcción.
- El empleo del Método 2 – Mezclado antes de colocarlo fue especialmente relevante, ya que redujo el tiempo de mezcla en más de la mitad, facilitando un proceso homogéneo y controlado.

- En general, el material mezclado mostró mayores resistencias iniciales, mejor cohesión y un desempeño superior frente a la erosión superficial.

- **Aumento significativo de la resistencia y reducción de la susceptibilidad al agua**

Los ensayos de campo confirmaron que la resistencia del saprolito aumentó de forma notable tras la estabilización con cemento.

- El valor promedio de resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ) alcanzó los 74 kPa, lo que representa un incremento del 85% en comparación con los 40 kPa registrados antes de la adición del aditivo.
- Este refuerzo redujo la susceptibilidad del relleno a la precipitación y filtración, disminuyendo de forma considerable la necesidad de retrabajos o eliminación de capas.
- Las mezclas con al menos 4.5% de cemento en volumen mostraron los mejores resultados en campo, consolidándose como la proporción más adecuada para garantizar tanto resistencia inicial como trabajabilidad.
- El material también evidenció un incremento progresivo de la resistencia con el tiempo, reforzando la confiabilidad del relleno.

- **Homogeneidad y características del material colocado**

La implementación del Método 2 de mezclado favoreció la obtención de un material homogéneo y de buena calidad, con mínimas incidencias de grumos de cemento o segregación.

- Las calicatas de exploración confirmaron una textura de relleno densa, hermética y de baja permeabilidad, con ausencia de defectos críticos como vacíos o lentes de material mal mezclado.
- En términos generales, la Zona 1 se caracterizó por un relleno bien tejido y de buena compacidad, lo que aseguró un desempeño hidráulico consistente con los objetivos de diseño.
- Aunque el contenido de humedad natural del saprolito permanecía por encima del OCH, la adición de cemento en proporciones entre 3% y 6% permitió contrarrestar este efecto, asegurando la resistencia mínima especificada.
- Debido a las bajas proporciones de cemento utilizadas, se determinó que el aditivo no comprometió la ductilidad del núcleo ni incrementó su fragilidad.

- **Desafíos y observaciones en campo con cemento**

Si bien el uso del cemento mejoró de forma significativa el desempeño del material, se identificaron ciertos desafíos durante la construcción:

- No se recomienda trabajar bajo lluvia continua, dado que la saturación compromete la calidad del relleno.
- En dos ocasiones se observaron agrietamientos asociados a la colocación de material más rígido y seco sobre capas más débiles y saturadas, lo que obligó a retirar y reemplazar dichas secciones.
- Las superficies compactadas por orugas y excavadoras tendían a dejar irregularidades que facilitaban el estancamiento de agua de lluvia, lo que ocasionó saturación localizada. En estos casos, fue necesario

retirar hasta 0.15 m de relleno saturado para continuar con la construcción.

- **Recomendaciones para el manejo en campo**

Con base en la experiencia obtenida, se formularon las siguientes recomendaciones:

- Establecer un plan integral de manejo de aguas superficiales, destinado a proteger las áreas de trabajo frente a la precipitación.
- Sellar rápidamente las capas con el equipo disponible en caso de lluvia, minimizando la infiltración y reduciendo la necesidad de retrabajos.
- Nivelar el relleno de forma adecuada para promover la escorrentía, evitando superficies irregulares que puedan acumular agua.
- Considerar la precipitación como un factor crítico del sitio, integrando su efecto en los planes de diseño y programación de la construcción.

#### **4.4 Análisis de la metodología de compactación y criterios de aprobación**

##### **4.5.1 Control de compactación – Proctor Estándar de un punto**

La construcción del núcleo de baja permeabilidad con saprolito estabilizado con cemento exigió una adaptación metodológica en el control de compactación, debido a las condiciones geotécnicas particulares del material y al entorno tropical del sitio. En este contexto, el uso del Proctor Estándar de un punto fue una medida clave para superar las limitaciones impuestas por el alto contenido de humedad natural del saprolito.

- **Desafío del contenido de humedad natural del saprolito**

El saprolito proveniente de las áreas de préstamo (Borrow 2, Borrow 4 y Borrow 5) presentó un contenido de humedad natural entre 30.21% y 34.37%, es decir, en promedio un 10% por encima del Contenido Óptimo de Humedad (OCH) obtenido mediante ensayos Standard Proctor.

- Este exceso de humedad generó baja trabajabilidad, resistencia al corte reducida y densidades de compactación insuficientes.
- En un ambiente de alta pluviometría amazónica, sin estación seca definida y con lluvias sostenidas durante todo el año, estas limitaciones se intensificaban.
- Los métodos convencionales de aireación o mezcla con suelos secos no eran prácticos en este contexto.
- El retrabajo del saprolito en estado natural incluso empeoraba su desempeño, pues liberaba agua atrapada en su estructura de meteorización, elevando aún más su humedad.

- **Adopción y metodología del Proctor Estándar de un punto**

Ante esta situación, se optó por aplicar el ensayo Proctor Estándar de un punto como referencia para el control de compactación:

- El método consistió en estimar la máxima densidad seca al contenido de humedad natural de la muestra, utilizando la misma energía de compactación del Proctor tradicional.
- Para la preparación de moldes en laboratorio, se usó como referencia la densidad seca obtenida al contenido natural de humedad, en lugar de la curva completa de 5 puntos.

- Esta modificación permitió establecer un control más realista y ajustado a las condiciones del material en campo.

- **Resultados y comparaciones de densidad**

Los ensayos arrojaron los siguientes valores de densidad:

- Proctor Estándar de un punto: máxima densidad seca entre 1,225 y 1,570 kg/m<sup>3</sup>, con promedio de 1,414 kg/m<sup>3</sup> y humedades entre 24.6% y 42.8%.
- Proctor Estándar de 5 puntos (tradicional): densidad seca entre 1,330 y 1,712 kg/m<sup>3</sup>, promedio de 1,527 kg/m<sup>3</sup>, y OCH entre 15% y 32% (promedio de 23%).

Estos resultados evidencian que el Proctor de un punto refleja mejor las condiciones reales del material, mientras que el Proctor tradicional resulta poco representativo en ambientes de alta humedad.

- Ambos métodos, mostrando cómo el Proctor de un punto se ajusta al comportamiento real del saprolito húmedo.

- **Aplicación en campo y cumplimiento de compactación**

La densidad in situ del saprolito-cemento (Zona 1) se verificó mediante cono de arena, densímetro nuclear y globo de goma, priorizando este último en los Recrecimientos N°1 y N°2.

- En campo, la densidad media alcanzada fue del 100% del Proctor Estándar de un punto, cumpliendo con los requisitos.
- El 83% de los ensayos de densidad superaron el 100% de la densidad de referencia.
- Los resultados comparados con la densidad de laboratorio confirmaron la validez de la metodología; la mayoría de los datos se concentraron dentro del rango de aceptación definido.

- **Implicaciones para los criterios de aprobación**

El uso del Proctor Estándar de un punto permitió integrar de forma práctica las condiciones del saprolito con los criterios de desempeño exigidos.

- Los rellenos con densidades menores al 100% fueron aprobados si cumplían con una resistencia al corte no drenado ( $S_u$ )  $\geq 50$  kPa, siempre que se observara un esfuerzo de compactación adecuado y una textura aceptable.
- Este enfoque adaptado confirmó la necesidad de un área de aprobación del material que no solo incluyera densidad y humedad, sino también parámetros de resistencia y permeabilidad, garantizando así el cumplimiento de los objetivos de diseño en condiciones tropicales adversas.

#### **4.5.2 Criterios de aprobación alternativos y rango de control de compactación**

La aplicación de criterios de compactación tradicionales basados únicamente en los resultados del ensayo Proctor Estándar demostró ser insuficiente en el contexto del proyecto, debido a las características particulares del saprolito tropical y a las condiciones ambientales de alta pluviometría. Por esta razón, fue necesario formular **criterios de aprobación alternativos**, integrando múltiples parámetros geotécnicos que permitieran garantizar el desempeño del saprolito-cemento como núcleo de baja permeabilidad.

- **Justificación de los criterios alternativos**

El establecimiento de un enfoque integral de control se sustentó en las siguientes consideraciones:

- El contenido de humedad natural del saprolito era elevado, con valores entre un 10% y un 25% superiores al OCH de los ensayos Proctor Estándar. En promedio, este exceso alcanzaba el 10%.
- Aunque el cemento mejoraba la trabajabilidad y resistencia, su hidratación era insuficiente para reducir la humedad natural hasta el OCH convencional, lo que limitaba la aplicabilidad de los criterios tradicionales.
- En consecuencia, se definió un área de aprobación del material que incorporara no solo densidad y humedad, sino también resistencia al corte no drenado, permeabilidad y porcentaje de vacíos como parámetros de control adicionales.
- **Parámetros clave y rangos de aprobación definidos**

Los criterios alternativos establecidos para la aceptación del relleno de saprolito-cemento fueron los siguientes:

**a) Resistencia al Corte No Drenado (Su):**

- Valor mínimo de aprobación:  $\geq 50$  kPa (medido mediante ensayos de veleta manual en campo).
- En campo, el promedio de Su alcanzó 72 kPa, representando un incremento del 85% respecto al promedio inicial sin cemento (40 kPa).
- Los valores conformes se concentraron en el rango de densidad seca entre 1250 y 1500 kg/m<sup>3</sup> y un contenido de humedad entre 25% y 37%.

- Incluso los rellenos con densidades in situ menores al 100% del Proctor Estándar de un punto fueron aprobados si cumplían con  $S_u \geq 50$  kPa, esfuerzo de compactación adecuado y textura aceptable.

**b) Permeabilidad:**

- Especificación máxima:  $< 1 \times 10^{-7}$  cm/s.
- Las pruebas de infiltración de campo (ASTM D3385) confirmaron tasas inferiores a este límite.
- Ensayos de laboratorio en muestras de campo (ASTM D5084) validaron que la mayoría de los resultados estaban también por debajo del umbral, con valores entre  $1.9 \times 10^{-9}$  m/s y  $1.1 \times 10^{-5}$  m/s, y un promedio de  $8.9 \times 10^{-7}$  m/s.
- Los puntos conformes se localizaron igualmente en el rango de densidad seca de 1250 a 1500 kg/m<sup>3</sup> y humedad de 25% a 37%.

**c) Densidad de Compactación:**

- Requisito: alcanzar el 100% de la máxima densidad seca del Proctor Estándar de un punto.
- La densidad media de campo cumplió este criterio, con un 83% de los ensayos de densidad dentro del rango especificado.

**d) Contenido de Humedad:**

- Límite máximo aceptable:  $< 38\%$ .
- El rango de aprobación se definió entre 25% y 37%.

**e) Porcentaje de Vacíos:**

- Se estableció un límite máximo de 5%, considerado un esfuerzo mínimo de compactación necesario para garantizar la baja permeabilidad del núcleo.

- Este criterio se evaluó en conjunto con la densidad seca y la humedad, y se interceptó con los resultados de resistencia y permeabilidad.

- **Representación gráfica de los criterios de aprobación**

El documento técnico incluyó representaciones gráficas que sustentan la aplicación de estos criterios:

- Relación entre densidad seca y contenido de humedad para los resultados de permeabilidad conformes ( $< 1 \times 10^{-7}$  cm/s).
- Relación entre densidad seca y humedad para los ensayos de veleta de corte con  $S_u \geq 50$  kPa.
- Área de aprobación definida, mostrando el rango de control de compactación alternativo (1250–1500 kg/m<sup>3</sup> de densidad seca y 25–37% de humedad).
- Comparación de la densidad de campo con la obtenida mediante el Proctor Estándar de un punto, confirmando que la mayoría de los resultados caen dentro del área de aprobación.

- **Compactación en campo bajo criterios alternativos**

La aplicación práctica de estos criterios durante la construcción se caracterizó por:

- Compactación del material en capas de 300 mm de espesor suelto, ejecutada principalmente con tractor de orugas.
- Uso de la cuchara de la excavadora o compactadores manuales en áreas de difícil acceso.

- Compactación mínima con 2 a 4 pasadas superpuestas del tractor, adaptadas a la humedad del relleno. En algunos casos se emplearon planchas compactadoras de 0.5 tn en zonas críticas.
- El resultado fue un material con textura densa, homogénea y bien tejida, observado en perforaciones, pozos de prueba y zanjas de anclaje.
- Los rellenos que presentaron condiciones blandas o sobresaturadas fueron rechazados de manera inmediata.

#### **4.5.3 Impacto económico de la estabilización con cemento**

La decisión de estabilizar el saprolito mediante la adición de cemento representó una solución técnica efectiva para garantizar el desempeño del núcleo de baja permeabilidad de la presa. Sin embargo, esta medida tuvo implicaciones económicas relevantes que deben ser consideradas dentro del análisis global del proyecto.

- **Incremento presupuestal general**

El mayor inconveniente de la estabilización con cemento radicó en el incremento sustancial de los costos unitarios asociados a la colocación del material.

- En términos globales, la implementación de esta medida significó un aumento presupuestal superior al 650% respecto al costo inicial.
  - Este sobre costo se convirtió en uno de los factores críticos para la planificación financiera y logística del proyecto, dado que modificó de manera significativa los valores unitarios estimados en las fases de diseño.
- **Costo del cemento y su transporte**

El aspecto económico más sensible estuvo vinculado al acarreo del cemento hasta el sitio del proyecto.

- El punto de distribución más cercano se encontraba a una distancia aproximada de 201 km, lo cual encareció considerablemente la cadena logística.
  - Como resultado, el costo del metro cúbico de cemento puesto en obra alcanzó los 324 US\$, un valor elevado en comparación con otros insumos de la presa.
  - Este componente logístico se consolidó como el factor determinante del incremento presupuestal.
- **Comparación del costo unitario de colocación del material**

El impacto económico se reflejó directamente en el costo unitario de colocación y conformado del material de relleno (que incluía corte en el área de préstamo y carguío):

- Antes de la estabilización, el costo era de 3.10 US\$/m<sup>3</sup>.
- Tras la implementación de la mezcla saprolito-cemento, este valor se elevó a 20.25 US\$/m<sup>3</sup>.
- Esta estimación se realizó considerando la adición de un 5% de cemento en volumen de mezcla, proporción que representaba un escenario estándar dentro de las actividades de construcción.

#### **4.5 Evaluación de la Viabilidad Económica de la Mezcla Saprolito–Cemento**

La evaluación de la viabilidad económica de la mezcla saprolito–cemento se centra en analizar el costo adicional que implica la estabilización mecánica frente a los beneficios asociados a la continuidad operativa del Proyecto Fruta del Norte (FDN).

#### 4.5.1 Incremento Presupuestal Directo

El mayor inconveniente económico del uso de cemento como aditivo estabilizante está ligado al incremento significativo del costo unitario del relleno:

Tabla 7.- Incremento de costo

| Concepto                                      | Costo unitario (US\$/m <sup>3</sup> ) | Variación |
|---|---------------------------------------|-----------|
| Colocación de saprolito natural (sin cemento) | 3.1                                   | -         |
| Colocación de saprolito-cemento (5% C)        | 20.25                                 | 552%      |

El costo del cemento fue el factor determinante en este incremento, debido a:

- Distancia de acarreo de aprox. 201 km desde el centro de distribución.
- Necesidad de dosificación y mezclado en campo.
- Alta proporción de material fino (saprolito) que demandaba mayor cantidad de aditivo para garantizar resistencia mínima.

En términos globales, la estabilización representó un aumento del 552% en el presupuesto unitario del relleno, comparado con la estimación inicial.

#### 4.5.2 Beneficios Operativos y de Cronograma

Si bien el costo se multiplicó, la decisión de utilizar cemento permitió:

- **Continuidad del cronograma de la presa de relaves:**
  - El núcleo de baja permeabilidad (Zona 1) era la **actividad crítica** para habilitar el almacenamiento de relaves y con ello mantener la operación de la planta de procesamiento.
  - Sin esta solución, el retraso en la construcción habría obligado a suspender la disposición de relaves, lo que equivale a **parar la producción de oro**.

- **Reducción de retrabajos y desperdicios:**
  - El saprolito natural sin estabilización presentó problemas de baja resistencia ( $S_u$  promedio = 40 kPa) y alta plasticidad, lo que generaba constantes fallas, retiro de capas y tiempos muertos.
  - Con cemento (4.5–6%), la resistencia inicial superó los **72 kPa en promedio**, lo que redujo pérdidas de material y horas hombre.
- **Aseguramiento de especificaciones:**
  - Cumplimiento de los requisitos de **permeabilidad  $<1 \times 10^{-7}$  m/s** y resistencia mínima al corte no drenado ( $S_u \geq 50$  kPa).
  - Mejora de la trabajabilidad en ambientes con alta pluviometría.

Tabla 8.- Análisis de Escenario: Cemento vs. No Cemento

| Escenario        | Costo inicial (US\$/m <sup>3</sup> ) | Riesgo principal  | Impacto económico-operativo  |
|------------------|--------------------------------------|---|--|
| Sin cemento      | 3.1                                  | Fallas de resistencia y permeabilidad. Saturación por lluvia. | Retrabajo, demoras >3–6 meses. Posible <b>paralización de planta de oro</b> . Pérdidas multimillonarias. |
| Con cemento (5%) | 20.25                                | Aumento del costo unitario >650%.                             | Avance constructivo continuo. Cumplimiento del cronograma. Producción de oro mantenida.                  |

Este análisis demuestra que, aunque la solución con cemento multiplica los costos unitarios de construcción, asegura la continuidad de la operación minera.

El costo incremental de 20 US\$/m<sup>3</sup> es marginal en comparación con el valor de la pérdida potencial de la producción de oro (estimada en cientos de miles de dólares por día de retraso).

#### 4.5.3 Conclusión de Viabilidad Económica

La estabilización con cemento es económicamente viable porque:

1. Evitó retrasos en la construcción del núcleo de la presa de relaves, garantizando la operación continua de la planta.

2. Los costos adicionales de material y transporte, aunque significativos en el presupuesto del relleno, resultan mínimos frente a las pérdidas que implicaría detener la producción de oro.
3. Se demostró que la mezcla saprolito–cemento cumplió con las propiedades mecánicas e hidráulicas exigidas, consolidando la decisión como técnicamente necesaria y económicamente estratégica.

En consecuencia, el análisis evidencia que la viabilidad de la solución no debe evaluarse únicamente en términos de costo unitario de relleno, sino en función de la sostenibilidad del proyecto minero completo, donde el beneficio de mantener la operación supera ampliamente el incremento de inversión inicial.

*Tabla 9.- Evaluación económica comparativa del uso de saprolito-cemento*

| Concepto   | Sin cemento (condición inicial) | Con cemento (solución implementada) | Variación (%) | Comentario técnico / Justificación   |
|--|---------------------------------|-------------------------------------|---------------|--|
| Costo unitario total (US\$/m <sup>3</sup> )              | 3.1                             | 20.25                               | 6.5           | El incremento se debe principalmente al uso y transporte del cemento.                            |
| Porcentaje de cemento en mezcla (vol.)                   | 0                               | 0.05                                | —             | Adición promedio utilizada para cumplir resistencia y permeabilidad.                             |
| Costo del cemento puesto en obra (US\$/m <sup>3</sup> )  | —                               | 324                                 | —             | Incluye transporte desde planta a 201 km.  |
| Costo por transporte del material (US\$/m <sup>3</sup> ) | 0.65                            | 2.1                                 | 2.23          | Aumento por traslado del cemento y tiempos logísticos adicionales.                               |
| Avance de construcción (m <sup>3</sup> /día)             | 40                              | 120                                 | 2             | Mejora significativa por reducción de retrabajo y fallas por saturación.                         |
| Cumplimiento de resistencia (Su ≥ 50 kPa)                | No cumple                       | Cumple (Su = 72 kPa)                | —             | Asegura continuidad del cronograma constructivo.   |
| Riesgo de pérdida de núcleo por saturación               | Alto                            | Bajo                                | ↓ 80%         | Mitigación directa de riesgo constructivo y operacional.   |
| Impacto en la operación del TSF                          | Riesgo de detención             | Continuidad garantizada             | —             | Sin el uso del cemento, se habría comprometido la estabilidad del núcleo y la operación del TSF. |

#### 4.6 Conclusiones parciales del análisis

Las conclusiones obtenidas en este estudio se basan en la integración de los resultados de laboratorio y de las observaciones de campo durante la construcción del núcleo de baja permeabilidad con saprolito estabilizado con cemento. Estos hallazgos permiten

comprender el desempeño del material bajo condiciones controladas y reales, así como establecer lineamientos prácticos para su uso en proyectos de características similares.

- **Conclusiones de los Ensayos de Laboratorio de la Mezcla Sapolito-Cemento**

Los ensayos de laboratorio realizados sobre mezclas de sapolito con diferentes porcentajes de cemento permitieron identificar el efecto del aditivo sobre las propiedades mecánicas y de trabajabilidad del material. Entre los principales hallazgos se destacan:

- Las mezclas con menos del 2.3% de cemento en volumen no alcanzaron la resistencia mínima requerida de 50 kPa durante la primera hora de mezclado, lo cual limita su uso práctico en condiciones de campo.
- Los rangos de 3% a 6% de contenido de cemento en volumen resultaron los más adecuados para garantizar un desempeño satisfactorio en términos de resistencia al corte.
- El valor de 4.5% de cemento en volumen se identificó como el punto medio óptimo, combinando facilidad de trabajabilidad, resistencia inicial adecuada y textura de baja permeabilidad.

- **Conclusiones del Trabajo de Campo y la Construcción del Núcleo de Baja Permeabilidad**

El análisis de los ensayos de campo y las observaciones constructivas evidenció que la adición de cemento tuvo un efecto decisivo en el éxito de la conformación del núcleo. Se concluye lo siguiente:

- Las mezclas con al menos 4.5% de cemento en volumen dieron los mejores resultados en campo, ya que el material se comportó como una masa densa, homogénea, de baja permeabilidad, con adecuada resistencia al corte inicial y fácil de trabajar.
- El bajo porcentaje de cemento utilizado significó que este aditivo no tuvo un impacto negativo en términos de fragilidad o disipación de presión de poro, garantizando que el núcleo cumpliera con la intención de diseño.
- El uso de equipos de compactación adecuados (tractores de oruga, excavadoras y planchas compactadoras) es fundamental para lograr una compactación eficiente en capas de 300 mm, garantizando la homogeneidad del relleno.
- Se identificó la necesidad de implementar un plan de manejo de aguas superficiales, con el fin de reducir la exposición del relleno a la precipitación y evitar la saturación del material durante la construcción.
- Es recomendable establecer un umbral máximo de precipitación para detener temporalmente la colocación del relleno, en función de los registros de equipos meteorológicos del sitio y de la experiencia acumulada en la obra.
- En etapas iniciales del proyecto, y en zonas críticas con presencia de filtraciones en la fundación, se requieren ensayos de control de calidad y aseguramiento más estrictos, con el fin de verificar el desempeño del material colocado y garantizar su función como barrera de baja permeabilidad.



## Capítulo 5.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

##### 5.1.1 Conclusiones de los Ensayos de Laboratorio de la Mezcla Sapolito-Cemento

Los ensayos de laboratorio realizados sobre la mezcla sapolito-cemento permitieron identificar el efecto del aditivo en las propiedades índice, de resistencia y de comportamiento del material en distintos contenidos de humedad y porcentajes de cemento.

A continuación, se presentan las principales conclusiones:

- **Requerimientos de porcentaje de cemento para resistencia inicial**

Los resultados demostraron que la cantidad de cemento es un factor determinante para garantizar el avance constructivo.

- Las mezclas con menos del 2.3% de cemento en volumen no alcanzaron el esfuerzo de corte mínimo de 50 kPa en la primera hora de mezclado, lo cual es insuficiente para liberar las capas en obra.
- Para un contenido de humedad natural de 30%, se requirió un mínimo del 3% de cemento en volumen para cumplir la resistencia de 50 kPa en una hora.
- Para el caso de 33% de humedad natural, el mínimo se redujo a 2.3% de cemento.
- Con contenidos de humedad más elevados (36%), fue necesario un 4.5% de cemento en volumen para superar los 50 kPa, aunque este valor se alcanzó recién a partir de las tres horas.

- **Rangos de cemento recomendados**

Las pruebas confirmaron que los valores de 3% a 6% de cemento en volumen son los más adecuados para garantizar un desempeño satisfactorio del saprolito estabilizado, siendo 4.5% un valor medio recomendado por su equilibrio entre trabajabilidad, resistencia y desempeño hidráulico.

- **Efecto en el contenido de humedad**

La adición de cemento no modificó significativamente el contenido de humedad del saprolito. A los 7 días de fraguado, la disminución del contenido de humedad natural fue inferior al 2%, lo que demuestra que la hidratación del cemento no es suficiente para contrarrestar el exceso de agua presente en el material.

- **Impacto en los Límites de Atterberg**

El análisis de plasticidad mostró una clara mejora en la clasificación del material:

- El Índice de Plasticidad (IP) del saprolito natural (IP = 18) disminuyó a un rango de 8 a 11 con la adición de cemento, principalmente por el incremento del Límite Plástico (LP).
- Con esta reducción del IP, las mezclas se clasificaron predominantemente como CL (arcilla de baja plasticidad) y ML (limo de baja plasticidad), mejorando su comportamiento geotécnico.

- **Granulometría y dispersión**

El material presentó un promedio de 55% de finos (pasante #200), clasificándose como fino, pero no mostró problemas de dispersión. El ensayo de dispersión lo clasificó como Grado 1 no dispersivo, consistente con su mineralogía dominada por caolinita e illita.

- **Incremento de resistencia al corte no drenado (veleta manual)**

La respuesta del material estabilizado fue positiva y progresiva:

- Todos los ensayos mostraron incrementos de resistencia, independientemente de la dosificación.
- Entre la primera hora y las 24 horas de mezclado, la resistencia al corte no drenado aumentó entre 170% y 600%, siendo más pronunciado a mayores contenidos de cemento.
- Entre el 60% y 90% de la resistencia total a los 7 días ya se había alcanzado en las primeras 24 horas.
- Las mezclas con 6% de cemento resultaron demasiado rígidas a partir del tercer día, impidiendo incluso la ejecución del ensayo de veleta.

- **Incremento de resistencia a la compresión simple (UCS) y esfuerzo de corte calculado**

- El saprolito sin cemento no alcanzó los valores mínimos de compresión simple requeridos ( $q_u > 100$  kPa), a pesar de mostrar un incremento progresivo en el tiempo.
- Las muestras con menor contenido de humedad lograron mayores resistencias con menores cantidades de cemento, mientras que las más húmedas necesitaron mayores dosificaciones para un desempeño equivalente.
- En general, la resistencia a la compresión simple se incrementó entre 100% y 800% entre la primera hora y las 24 horas, alcanzando entre 71% y 95% de la resistencia estimada a 7 días.

- **Relación deformación unitaria y esfuerzo de compresión**

Los resultados mostraron que, a mayor porcentaje de cemento, el material adquiere mayor rigidez y resistencia a la compresión simple, con tendencia a comportarse de manera más frágil. No obstante, se destacó que el modo de falla en una mezcla suelo-cemento difiere de un ensayo UCS convencional, por lo que no se puede concluir categóricamente que el aumento de cemento implique un comportamiento frágil.

*Tabla 10.- Resultados comparativos de propiedades físico-mecánicas del saprolito natural vs. saprolito-cemento*

| Propiedad                                    | Saprolito natural   | Saprolito-cemento (4.5-6%) | Mejora observada                    | Ensayo / Norma      |
|--|---------------------|----------------------------|-------------------------------------|---------------------|
| Contenido de humedad (%)                     | 31-36               | 32-35                      | —                                   | ASTM D2216          |
| Límite Líquido (LL)                          | 37-40               | 39-53                      | +15% (aumento del LP)               | ASTM D4318          |
| Índice de Plasticidad (IP)                   | 18                  | 8-11                       | -45%                                | ASTM D4318          |
| Gravedad específica (Gs)                     | 2.63                | 2.64                       | ≈ igual                             | ASTM D854           |
| Resistencia al corte no drenado (Su, kPa)    | 26-68 (promedio 40) | 72 (máx. 200)              | 0.85                                | ASTM D2573 (veleta) |
| Resistencia a la compresión simple (qu, kPa) | <100                | 300-800                    | +400-800%                           | ASTM D2166          |
| Clasificación USCS                           | CL-ML               | CL / ML (baja plasticidad) | Mejora en comportamiento geotécnico | ASTM D2487          |

### 5.1.2 Conclusiones sobre el Núcleo de Baja Permeabilidad

Las experiencias de construcción y los ensayos realizados en campo durante la conformación del Dique de Arranque y los Recrecimientos N°1 y N°2 proporcionaron conclusiones clave sobre el desempeño del saprolito estabilizado con cemento como material de núcleo de baja permeabilidad. Estas conclusiones reflejan tanto la efectividad del aditivo como los desafíos enfrentados en un entorno tropical de alta pluviometría.

- **Desempeño óptimo de la mezcla saprolito-cemento en campo**

La incorporación de cemento en la mezcla de saprolito permitió superar las limitaciones observadas en la fase inicial sin estabilización.

- Las mezclas con al menos 4.5% de cemento en volumen mostraron un comportamiento óptimo, caracterizado por una textura de baja permeabilidad, adecuada resistencia al corte inicial y facilidad de colocación.
  - La adición de cemento mejoró significativamente la trabajabilidad del saprolito, reduciendo su susceptibilidad a la saturación por lluvia o filtraciones. Esto se tradujo en un avance más eficiente de la construcción y en una disminución considerable del retrabajo y de la eliminación de capas dañadas.
  - En general, el relleno de Zona 1 alcanzó una textura bien tejida y hermética, con mínima presencia de grumos de cemento, vacíos o lentes mal mezclados.
- 
- **Impacto del cemento en la fragilidad y cumplimiento del diseño**
    - Dado que el rango de adición de cemento se mantuvo bajo (1% a 6% en volumen), este aditivo no generó efectos de fragilidad ni alteró la disipación de presiones de poro.
    - Los ensayos triaxiales en muestras inalteradas confirmaron un comportamiento dúctil del material, con una cohesión promedio de 70 kPa, cumpliendo con la intención de diseño de una barrera dúctil y de baja permeabilidad.
- 
- **Propiedades de resistencia y compactación alcanzadas en campo**
    - El promedio de resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ) fue de 72 kPa, lo que representa un incremento del 85% respecto a los 40 kPa registrados en el saprolito natural sin adición de cemento. El valor residual se mantuvo en torno a 40 kPa, con una sensibilidad ligera a moderada (media de 1.9).

- La densidad media de campo alcanzó el 100% del Proctor Estándar de un punto, cumpliendo con las especificaciones. Además, el 83% de los ensayos de densidad lograron dicho requisito.
- El peso unitario húmedo del saprolito con cemento osciló entre 14.3 kN/m<sup>3</sup> y 26.2 kN/m<sup>3</sup>, con una media de 18.2 kN/m<sup>3</sup>, reflejando consistencia en la compactación.
- En casos donde la densidad in situ fue inferior al 100% del Proctor Estándar de un punto, las capas se aprobaron siempre que la Su fuera  $\geq 50$  kPa y se verificara un esfuerzo de compactación adecuado y texturas de relleno homogéneas.
- **Desempeño de permeabilidad**
  - Las pruebas de infiltración de campo (ASTM D3385) evidenciaron tasas de infiltración menores a  $1 \times 10^{-7}$  cm/s, aunque sin mediciones precisas debido a las bajas tasas.
  - Los ensayos de permeabilidad en laboratorio (ASTM D5084) confirmaron que la mayoría de los resultados estuvieron por debajo del límite de  $1 \times 10^{-7}$  m/s, con valores entre  $1.9 \times 10^{-9}$  m/s y  $1.1 \times 10^{-5}$  m/s, y una media de  $8.9 \times 10^{-7}$  m/s. Esto sugiere que la tasa de infiltración real del núcleo fue menor a la considerada en el diseño, aumentando su seguridad hidráulica.
- **Conclusiones para el equipo y la gestión en campo**
  - Se verificó que el uso de tractor de oruga, excavadora y planchas compactadoras resultó suficiente para lograr una compactación adecuada, siempre que la operación se realizara de forma rápida y controlada.
  - Se identificó la necesidad de un plan de manejo de aguas superficiales, orientado a minimizar la exposición del relleno a la lluvia directa.

- Se recomendó establecer límites de precipitación máxima para suspender las labores de colocación, definidos con base en el monitoreo meteorológico y la experiencia operativa del sitio.
- En áreas críticas, como aquellas con filtraciones provenientes de la fundación, se aconsejó aplicar un control de calidad más estricto, incluyendo ensayos adicionales de verificación del desempeño del relleno.
- **Desafíos y lecciones aprendidas durante la construcción con cemento**
  - A pesar de las mejoras logradas, no se recomienda ejecutar trabajos en condiciones de lluvia continua, ya que la saturación compromete la calidad del relleno.
  - Se presentaron casos de agrietamiento en dos ocasiones, relacionados con la colocación de capas más rígidas y secas sobre material más débil y saturado. Estas zonas fueron corregidas mediante retiro y sustitución del material.
  - Las huellas e irregularidades superficiales dejadas por los equipos de compactación favorecieron el estancamiento de agua de lluvia, lo que en algunos casos obligó a retirar hasta 0.15 m de material saturado antes de continuar.

Tabla 11.- Resultados promedio de campo del núcleo de baja permeabilidad (Zona 1)

| Propiedad   | Promedio             | Rango observado                             | Requisito de diseño     | Cumplimiento               |
|---|----------------------|---|-------------------------|----------------------------|
| Resistencia al corte no drenado (Su, kPa)         | 72                   | 38-200                                      | ≥ 50 kPa                | ☑ Cumple                   |
| Cohesión efectiva (c, kPa)                        | 70                   | —   | 60-80 kPa               | ☑ Cumple                   |
| Densidad seca <i>in situ</i> (kg/m <sup>3</sup> ) | 1 406                | 1 159-1 837                                 | ≥ 1 250                 | ☑ Cumple                   |
| Compactación relativa (%)                         | 100                  | 94-105                                      | ≥ 95 %                  | ☑ Cumple                   |
| Permeabilidad (k, m/s)                            | 8.9×10 <sup>-7</sup> | 1.9×10 <sup>-9</sup> - 1.1×10 <sup>-5</sup> | ≤ 1×10 <sup>-7</sup>    | ⚠ Marginal-Cumple (segura) |
| Peso unitario húmedo (kN/m <sup>3</sup> )         | 18.2                 | 14.3-26.2                                   | 17-19 kN/m <sup>3</sup> | ☑ Cumple                   |
| Tipo de comportamiento                            | —                    | Dúctil                                      | Dúctil requerido        | ☑ Cumple                   |

### 5.1.3 Cumplimiento de los Objetivos de la Investigación

La integración de los resultados de laboratorio, campo y análisis económico permitió verificar el cumplimiento completo de los objetivos planteados, conforme se muestra a continuación:

Tabla 12.- Cumplimiento de los objetivos de la investigación

| Objetivo   | Evidencia técnica obtenida  | Sección / Tabla               |
|--|---|-------------------------------|
| Objetivo general: Evaluar la efectividad del saprolito-cemento como núcleo de baja permeabilidad | El núcleo cumplió con la intención de diseño: Permeabilidad $\leq 1 \times 10^{-7}$ m/s, Su promedio 72 kPa $\geq 50$ kPa, comportamiento dúctil. | 5.1.1 – 5.1.2, Tablas 10 y 11 |
| Caracterizar propiedades físico-mecánicas  | Ensayos de humedad, Atterberg, granulometría, UCS y Su. Resultados: IP reducido a 8-11, Su 72 kPa, qu $> 100$ kPa.                                | 4.1.1, 4.1.2 – Tabla 2 y 3    |
| Comparar desempeño con especificaciones de diseño  | Valores de resistencia y permeabilidad cumplieron CDA/COLD: Su $\geq 50$ kPa, k $\leq 1 \times 10^{-7}$ m/s.                                      | 4.2.2, 4.2.3 – Tabla 5 y 6    |
| Evaluar viabilidad financiera  | Costo unitario pasó de 3.10 US\$/m <sup>3</sup> a 20.25 US\$/m <sup>3</sup> (+650%).  | 4.5.1 - Tabla 9               |
| Proponer directrices de control y calidad  | Recomendaciones de % de cemento (3-6%), criterios alternativos de compactación (Su $\geq 50$ kPa, humedad 25-37%, vacíos $\leq 5\%$ ).            | 5.2.1 y 5.2.2                 |

En síntesis, los resultados confirman que el proyecto cumplió satisfactoriamente con todos los objetivos específicos y el objetivo general, demostrando que la mezcla de saprolito-cemento constituye una solución técnica, operativa y económicamente viable para núcleos de presas en regiones tropicales de alta pluviosidad como Zamora Chinchipe.

## 5.2 Recomendaciones

### 5.2.1 Recomendaciones Generales de Manejo y Construcción

Las recomendaciones presentadas a continuación surgen de la integración de los resultados de laboratorio y de las observaciones directas en campo durante la construcción del núcleo de baja permeabilidad con saprolito-cemento. Estas pautas constituyen lineamientos clave para optimizar el desempeño del material en futuros proyectos, especialmente en contextos de selva tropical donde la elevada pluviometría y la humedad natural del saprolito representan los principales desafíos técnicos.

- **Gestión de la Exposición a la Precipitación y al Agua Superficial**

- **Sellado rápido de capas:** Ante la presencia de lluvia, resulta indispensable sellar inmediatamente la superficie expuesta con el equipo disponible, reduciendo la penetración de agua en el relleno. Esta práctica previene la saturación y la pérdida de trabajabilidad, que en observaciones de campo obligaron a retirar hasta 0.15 m de material afectado.
  - **Nivelación del relleno:** Es recomendable mantener el relleno nivelado para facilitar la escorrentía del agua superficial. Sin embargo, deben evitarse pendientes abruptas que puedan inducir procesos de erosión superficial.
  - **Plan de manejo de aguas superficiales:** Se debe implementar un plan integral de control de aguas pluviales, diseñado para minimizar la exposición directa del material a la precipitación. Dado que en la selva amazónica no existe una estación seca definida y las lluvias son persistentes, este plan constituye una medida esencial de aseguramiento constructivo.
  - **Evaluación del máximo de precipitación:** Cada proyecto debe definir un umbral máximo de lluvia que obligue a detener las operaciones de colocación, ajustado a la instrumentación meteorológica disponible y a la experiencia previa en el sitio.
- 
- **Consideraciones sobre el Uso de Cemento y Optimización de la Mezcla**
    - **Decisión del uso de cemento:** La aplicación de cemento debe evaluarse en función de las condiciones climáticas y operativas. Durante períodos de baja precipitación podría considerarse la colocación de saprolito sin aditivos, aunque la estabilización con cemento ha demostrado ser la solución más efectiva bajo condiciones de humedad elevada.

- **Rangos de cemento recomendados:** El rango óptimo se sitúa entre 3% y 6% en volumen de cemento, con un valor medio de 4.5% que mostró un equilibrio adecuado entre resistencia, trabajabilidad y control de permeabilidad. Dosificaciones inferiores al 2.3% no alcanzan la resistencia mínima requerida (50 kPa) en las primeras horas de mezclado.
  - **Contenido de humedad inicial:** La selección del porcentaje de cemento debe considerar la humedad natural del saprolito, ya que suelos más secos logran mejores resistencias con menores cantidades de cemento, mientras que suelos más húmedos requieren porcentajes más elevados para un desempeño aceptable.
- **Optimización del Proceso Constructivo y del Control de Calidad**
    - **Equipo y rapidez de compactación:** El uso de tractores de oruga, excavadoras y planchas compactadoras ha demostrado ser adecuado, siempre que la compactación se realice con rapidez. La velocidad en esta etapa es esencial para aprovechar la ventana de trabajabilidad antes de que avance la hidratación del cemento y para minimizar los efectos de la precipitación.
    - **Aumento del monitoreo y control de calidad:** Se recomienda reforzar las campañas de control de calidad mediante ensayos más frecuentes y de mayor alcance (incluyendo SCPTu en el relleno), a fin de identificar oportunamente problemas de saturación, blandura o riesgo de asentamientos.
    - **Criterios de aprobación estrictos en etapas críticas:** En fases iniciales y en zonas donde existan filtraciones desde la fundación, los criterios de aseguramiento de calidad deben ser más exigentes, aplicando controles adicionales para garantizar la estabilidad del núcleo.

- **Control de compactación alternativo:** El Proctor Estándar de un punto ha probado ser la metodología más adecuada para saprolitos con alta humedad natural. Este debe complementarse con un esquema integral de aprobación que considere simultáneamente:
  - Resistencia al corte no drenado ( $S_u \geq 50$  kPa).
  - Permeabilidad menor a  $1 \times 10^{-7}$  cm/s.
  - Densidad seca en el rango de 1250–1500 kg/m<sup>3</sup>.
  - Contenido de humedad entre 25% y 37%.
  - Porcentaje de vacíos  $\leq 5\%$ .

### 5.2.2 Recomendaciones para Investigaciones Futuras

Con el propósito de ampliar el conocimiento técnico sobre el comportamiento del saprolito estabilizado con cemento y garantizar su uso más eficiente en futuros proyectos de ingeniería de presas en entornos tropicales, se plantean las siguientes recomendaciones orientadas a investigaciones complementarias:

- Realización de ensayos SCPTu (Sounding Cone Penetration Test with Pore Pressure Measurement):
  - Se recomienda llevar a cabo ensayos de penetración de cono con medición de presión de poros (SCPTu) directamente a través del relleno de saprolito-cemento.
  - Esta técnica proporcionaría una caracterización más completa y confiable de las propiedades in situ, incluyendo parámetros de resistencia al corte no drenado, rigidez del material y condiciones de presión intersticial.

- La información obtenida sería particularmente valiosa para gestionar el riesgo de rellenos saturados, blandos o susceptibles a asentamientos, condiciones críticas en ambientes tropicales con alta pluviometría.
- Además, los datos del SCPTu permitirían validar y complementar los resultados obtenidos en laboratorio y ensayos de control de calidad en campo, consolidando un marco de referencia más robusto para el diseño y monitoreo de futuros proyectos.

En resumen, la aplicación de ensayos SCPTu constituye una herramienta clave para profundizar en la comprensión del desempeño geotécnico del saprolito-cemento, y debería considerarse como una línea prioritaria de investigación en etapas posteriores del proyecto o en desarrollos similares en la región.

## REFERENCIAS

### Bibliografía

- ABC Geomechanical Consulting. (2020). *¿QUE ES UN MACIZO ROCOSO? Y CLASIFICACION GEOMECANICA DE ROCAS*. Obtenido de ¿Qué son las discontinuidades?: <https://geomecanicaymecanicarocas.com/macizo-rocoso/>
- Añazco Toro, L. A. (2017). *CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA Y DISEÑO DE TALUDES EN LA. Guayaquil*. Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/41146/1/D-CD70236.pdf>
- Apestegui, J. (2021). *Caracterización de las Discontinuidades y Análisis de la Estabilidad del Talud en Roca en el Asentamiento Humano Inty Llacta*. Huancayo. Obtenido de <http://www.merlot.org/merlot/viewMaterial.htm?id=773130758>
- EROSION.COM.CO. (14 de 2 de 2022). *Estabilidad sísmica de taludes*. Obtenido de <https://www.erosion.com.co/estabilidad-sismica-de-taludes/>
- etsecpb. (2021). *upcommons*. Obtenido de Criterio de rotura lineal de Mohr-Coulomb: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6529/06.pdf?sequence=7&isAllowed=y>
- GEOLOGIAWEB. (2022). *Macizo rocoso, matriz rocosa y discontinuidades. Descripción y caracterización de macizos rocosos*. Obtenido de Discontinuidades: <https://geologiaweb.com/ingenieria-geologica/macizo-rocoso/>
- Glosario. (08 de 04 de 2012). Obtenido de Esquistosidad: <https://glosarios.servidor-alicante.com/geologia/esquistosidad>
- Glosario Geología. (08 de 04 de 2012). Obtenido de Estratificación, plano de estratificación: <https://glosarios.servidor-alicante.com/geologia/estratificacion-plano-de-estratificacion>

- Hernández, K. (2018). *Criterios de resistencia al corte de las discontinuidades rocosas*.  
Obtenido de Resistencia al corte en macizos rocosos:  
<https://oa.upm.es/32290/#:~:text=La%20resistencia%20al%20corte%20de,de%20otras%20obras%20de%20ingenier%C3%ADa>.
- Huerta, R. (2015). *Rotura Plana*. Obtenido de  
[https://oa.upm.es/14183/2/MECANICA\\_DE\\_ROCAS\\_2.pdf](https://oa.upm.es/14183/2/MECANICA_DE_ROCAS_2.pdf)
- Hurlimann, M. (2016). *slideshare*. Obtenido de Clasificaciones Geomecánicas:  
<https://es.slideshare.net/EdwinDiaz40/clasificaciones-geomecnicas>
- Ingeoexpert. (5 de Abril de 2018). *Rocas sedimentarias: tipos, subtipos y clasificación*.  
Obtenido de Rocas sedimentarias: <https://ingeoexpert.com/2018/04/05/tipos-rocas-sedimentarias/>
- Ingeoexpert. (8 de Noviembre de 2019). *¿Qué son las rocas metamórficas?* Obtenido de Rocas metamórficas: tipos y clasificación: <https://ingeoexpert.com/2019/11/08/rocas-metamorficas-tipos-y-clasificacion/>
- Ingeoexpert. (29 de Octubre de 2020). *Rocas Ígneas: tipos y características*. Obtenido de ¿Qué son las rocas ígneas?: <https://ingeoexpert.com/2020/10/29/rocas-igneas-tipos-caracteristicas/>
- INYGE. (2013). *Caracterización Geologica Tecnica*. Obtenido de  
<http://www.inyge.cl/html/cgeologica.html>
- Iñiguez, J. B. (2016). *Análisis dinámico de estabilidad de taludes por medio de elementos finitos*. CUENCA.
- Juan, D., & et al. (2021). *Caracterización geomecánica de la masa rocosa mediante la cartilla de Bieniawski para la propuesta del sistema de fortificación*. Obtenido de  
Caracterización geomecánica de macizos rocosos:

[https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/10347/1/IV\\_FIN\\_110\\_T  
E\\_Diaz\\_Vicente\\_Vilcapoma\\_2021.pdf](https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/10347/1/IV_FIN_110_T<br/>E_Diaz_Vicente_Vilcapoma_2021.pdf)

MELENTIJEVIC, S. (2018). *ESTABILIDAD DE TALUDES EN MACIZOS ROCOSOS* .

Obtenido de <https://oa.upm.es/722/1/04200507.pdf>

Monte Parra, I. A. (2020 de 2020). *ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES DE ROCA*

*MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS*. Obtenido de

[http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/461/1/Tesis\\_Analisis\\_de\\_estabilidad.pdf](http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/461/1/Tesis_Analisis_de_estabilidad.pdf)

RSN. (24 de Enero de 2019). *¿Qué es una falla geológica?* Obtenido de Geología:

<https://rsn.ucr.ac.cr/documentos/educativos/geologia/244-que-es-una-falla>

Suarez, J. (2021). *Estabilidad sísmica de taludes*. Obtenido de

<https://core.ac.uk/display/490614126?source=1&algorithmId=15&similarToDoc=275>










[636559&similarToDocKey=CORE&recSetID=20767eac-b3c4-410e-98f7-](https://core.ac.uk/display/490614126?source=1&algorithmId=15&similarToDoc=275)

[ed0e3efee26a&position=1&recommendation\\_type=same\\_repo&otherRecs=49061412](https://core.ac.uk/display/490614126?source=1&algorithmId=15&similarToDoc=275)

[6,530010321,355130513,389470498,234589653](https://core.ac.uk/display/490614126?source=1&algorithmId=15&similarToDoc=275)

# ANEXOS









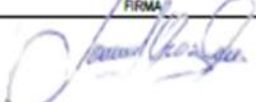
## Borrow 5 - Ensayos

| AURELIAN<br>ECUADOR S.A.   |  | FRUTA DEL NORTE PROJECT QUALITY DOCUMENTATION<br>PROYECTO FRUTA DEL NORTE DOCUMENTACIÓN DE CALIDAD |  |   |   |  |  |   |   |   |
|--|--|--|--|---|---|--|--|---|---|---|
| STANDARD TEST METHOD FOR COMPRESSIVE STRENGTH OF MOLDED SOIL-CEMENT CYLINDERS D 1633 / D 1632 / D 2166<br>MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE CILINDROS DE SUELO - CEMENTO MOLDEADO D 1633 / D 1632 / D 2166 |  |  |  |   |   |  | ITR - 032 - 48   |   | Rev 00  |   |
| WBS/AREA<br>WBS/ÁREA   |  | 3801   |  | REPORT No.  |   | CI - 3801 - 032 - 48 -0001   |  |   |   |   |
| TESTED BY<br>ENSAYADO POR  |  | Kenny Moreira  |  | CALCULATED BY<br>CALCULADO POR  |   | Kenny Moreira  |  |   |   |   |
| SAMPLE DESCRIPTION<br>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA  |  |  | LIMOS ARENOSO COLOR MARRON + CEMENTO 1%  |   |   |  | TYPE OF CEMENT<br>TIPO DE CEMENTO  |   | GUAPAN TIPO IP [ 1 % ]  |   |
| CYLINDER N°<br>CILINDRO N°   |  |  | 1001   | 1002  | 1003  | 1004   | 1005   | 1006  | 1007  | 1008  |
| SAMPLING LOCATION<br>UBICACIÓN DEL MUESTREO  |  |  | TSF<br>BORROW 5<br>PROF: 30CM DE SUELO NATURAL   |   |   |  |  |   |   |   |
| MOLDING DATE<br>FECHA DE MOLDEO  |  |  | 29-Dec-19  | 29-Dec-19   | 29-Dec-19   | 29-Dec-19  | 29-Dec-19  | 29-Dec-19   | 29-Dec-19   | 29-Dec-19   |
| TEST DATE<br>FECHA DE ENSAYO   |  |  | 29-Dec-19  | 29-Dec-19   | 30-Dec-19   | 30-Dec-19  | 5-Jan-20   | 5-Jan-20  | 26-Jan-20   | 26-Jan-20   |
| AGE (DAYS)<br>EDAD (DÍAS)  |  |  | INSTANTLY  | INSTANTLY   | 1   | 1  | 7  | 7   | 28  | 28  |
| DIAMETER<br>DIÁMETRO [mm]  |  |  | 71.0   | 71.0  | 71.0  | 71.0   | 71.0   | 71.0  | 71.0  | 71.0  |
| HEIGHT<br>ALTURA [mm]  |  |  | 143.0  | 143.0   | 143.0   | 143.0  | 143.0  | 143.0   | 143.0   | 143.0   |
| INITIAL AREA<br>ÁREA INICIAL [mm <sup>2</sup> ]  |  |  | 3959.2   | 3959.2  | 3959.2  | 3959.2   | 3959.2   | 3959.2  | 3959.2  | 3959.2  |
| VOLUME<br>VOLUMEN [cm <sup>3</sup> ]   |  |  | 566.2  | 566.2   | 566.2   | 566.2  | 566.2  | 566.2   | 566.2   | 566.2   |
| WEIGHT<br>PESO [gr]  |  |  | 1066.0   | 1063.0  | 1066.0  | 1063.0   | 1064.0   | 1065.0  | 1066.0  | 1065.0  |
| WET DENSITY<br>DENSIDAD HUMEDA [gr/cm <sup>3</sup> ]   |  |  | 1.883  | 1.878   | 1.883   | 1.878  | 1.879  | 1.881   | 1.883   | 1.881   |
| MOISTURE AFTER THE TEST<br>HUMEDAD DESPUÉS DEL TEST [%]  |  |  | 29.76  | 29.76   | 29.60   | 29.60  | 28.31  | 28.41   | 28.71   | 27.92   |
| DRY DENSITY<br>DENSIDAD SECA [gr/cm <sup>3</sup> ]   |  |  | 1.431  | 1.447   | 1.433   | 1.449  | 1.465  | 1.463   | 1.463   | 1.470   |
| UNITARY DEFORMATION<br>DEFORMACIÓN UNITARIA [%]  |  |  | 4.20   | 3.85  | 3.85  | 3.50   | 4.83   | 5.88  | 6.29  | 6.29  |
| CORRECTED AREA<br>ÁREA CORREGIDA [mm <sup>2</sup> ]  |  |  | 4132.8   | 4117.7  | 4117.7  | 4102.8   | 4160.0   | 4206.6  | 4225.1  | 4225.1  |
| BREAKING LOAD<br>CARGA DE RUPTURA [N]  |  |  | 201.0  | 173.8   | 194.7   | 198.9  | 204.1  | 163.4   | 225.1   | 184.2   |
| COMPRESSIVE STRESS<br>ESFUERZO DESVIADOR [kpa]   |  |  | 48.64  | 42.21   | 47.28   | 48.48  | 49.06  | 38.84   | 53.28   | 43.60   |
| SHEAR STRESS<br>ESFUERZO CORTANTE [kpa]  |  |  | 32   | 28  | 32  | 30   | 24   | 26  | 44  | 42  |
| TESTED SAMPLE PICTURE<br>IMAGEN DE LA MUESTRA ENSAYADA   |  |  |                         |  |  |   |  |  |  |  |
| OBSERVATIONS<br>OBSERVACIONES  |  |  | Humedad natural del suelo antes de mezclar con cemento 30.7%<br>Caracterización de material (Muestra 3137) |   |   |  |  |   |   |   |
| LABORATORY LEADER<br>LÍDER DE LABORATORIO  |  |  | PRINT NAME<br>NOMBRE IMPRESO   |   |   | SIGNATURE<br>FIRMA   |  | DATE<br>FECHA   |   |   |
| Cristian Orozco  |  |  |  |   |   |  |  | 26-Jan-20   |   |   |

STANDARD TEST METHOD FOR COMPRESSIVE STRENGTH OF MOLDED SOIL-CEMENT CYLINDERS D 1633 / D 1632 / D 2166  
MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE CILINDROS DE SUELO - CEMENTO MOLDEADO D 1633 / D 1632 / D 2166










ITR - 032 - 48 Rev 00

|                           |               |                                |                            |
|---------------------------|---------------|--------------------------------|----------------------------|
| WBS/AREA<br>WBS/ÁREA      | 3801          | REPORT No.                     | CI - 3801 - 032 - 48 -0003 |
| TESTED BY<br>ENSAYADO POR | Kenny Moreira | CALCULATED BY<br>CALCULADO POR | Kenny Moreira              |

| SAMPLE DESCRIPTION<br>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA         | LIMOS ARENOSO COLOR MARRON + CEMENTO 3%  |   |  |   | TYPE OF CEMENT<br>TIPO DE CEMENTO  |   | GUAPAN TIPO IP [ 3% ]   |   |
|---|--|---|--|---|--|---|---|---|
|   | 1017   | 1018  | 1019   | 1020  | 1021   | 1022  | 1023  | 1024  |
| CYLINDER N°<br>CILINDRO N°                              |  |   |  |   |  |   |   |   |
| SAMPLING LOCATION<br>UBICACIÓN DEL MUESTREO             | TSF<br>BORROW 5<br>PROF: 30CM DE SUELO NATURAL   |   |  |   |  |   |   |   |
| MOLDING DATE<br>FECHA DE MOLDEO                         | 1-Jan-20   | 1-Jan-20  | 1-Jan-20   | 1-Jan-20  | 1-Jan-20   | 1-Jan-20  | 1-Jan-20  | 1-Jan-20  |
| TEST DATE<br>FECHA DE ENSAYO                            | 1-Jan-20   | 1-Jan-20  | 2-Jan-20   | 2-Jan-20  | 8-Jan-20   | 8-Jan-20  | 29-Jan-20   | 29-Jan-20   |
| AGE (DAYS)<br>EDAD (DÍAS)                               | INSTANTLY  | INSTANTLY   | 1  | 1   | 7  | 7   | 28  | 28  |
| DIAMETER<br>DIÁMETRO [mm]                               | 71.0   | 71.0  | 71.0   | 71.0  | 71.0   | 71.0  | 71.0  | 71.0  |
| HEIGHT<br>ALTURA [mm]                                   | 143.0  | 143.0   | 143.0  | 143.0   | 143.0  | 143.0   | 143.0   | 143.0   |
| INITIAL AREA<br>ÁREA INICIAL [mm <sup>2</sup> ]         | 3959.2   | 3959.2  | 3959.2   | 3959.2  | 3959.2   | 3959.2  | 3959.2  | 3959.2  |
| VOLUME<br>VOLUMEN [cm <sup>3</sup> ]                    | 366.2  | 366.2   | 366.2  | 366.2   | 366.2  | 366.2   | 366.2   | 366.2   |
| WEIGHT<br>PESO [gr]                                     | 1065.0   | 1064.0  | 1066.0   | 1066.0  | 1068.0   | 1068.0  | 1067.0  | 1068.0  |
| WET DENSITY<br>DENSIDAD HUMEDA [gr/cm <sup>3</sup> ]    | 1.881  | 1.879   | 1.883  | 1.883   | 1.886  | 1.886   | 1.885   | 1.886   |
| MOISTURE AFTER THE TEST<br>HUMEDAD DESPUÉS DEL TEST [%] | 29.04  | 29.04   | 29.78  | 29.78   | 28.10  | 27.73   | 30.33   | 30.15   |
| DRY DENSITY<br>DENSIDAD SECA [gr/cm <sup>3</sup> ]      | 1.458  | 1.456   | 1.451  | 1.451   | 1.473  | 1.477   | 1.444   | 1.449   |
| UNITARY DEFORMATION<br>DEFORMACIÓN UNITARIA [%]         | 2.45   | 2.45  | 3.15   | 3.15  | 2.94   | 2.52  | 2.20  | 2.08  |
| CORRECTED AREA<br>ÁREA CORREGIDA [mm <sup>2</sup> ]     | 4058.6   | 4058.6  | 4087.8   | 4087.8  | 4079.0   | 4061.4  | 4048.1  | 4043.3  |
| BREAKING LOAD<br>CARGA DE RUPTURA [N]                   | 307.8  | 296.3   | 385.3  | 372.7   | 460.6  | 424.0   | 473.2   | 421.9   |
| COMPRESSIVE STRESS<br>ESFUERZO DESVIADOR [kpa]          | 75.84  | 73.00   | 94.26  | 91.17   | 112.92   | 104.40  | 116.89  | 104.34  |
| SHEAR STRESS<br>ESFUERZO CORTANTE [kpa]                 | 54   | 52  | 94   | 94  | 144  | 138   | 152   | 150   |
| TESTED SAMPLE PICTURE<br>IMAGEN DE LA MUESTRA ENSAYADA  |                         |  |                         |  |  |  |  |  |
| OBSERVATIONS<br>OBSERVACIONES                           | Humedad natural del suelo antes de mezclar con cemento 30.7%<br>Caracterización de material (Muestra 3137) |   |  |   |  |   |   |   |
| LABORATORY LEADER<br>LÍDER DE LABORATORIO               | PRINT NAME<br>NOMBRE IMPRESO<br>Cristian Orozco  |   | SIGNATURE<br>FIRMA<br> |   |  | DATE<br>FECHA<br>29-Jan-20  |   |   |

|  |                |        |
|--|----------------|--------|
| STANDARD TEST METHOD FOR COMPRESSIVE STRENGTH OF MOLDED SOIL-CEMENT CYLINDERS D 1633 / D 1632 / D 2166<br>MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA LA RESISTENCIA A COMPRESION DE CILINDROS DE SUELO - CEMENTO MOLDEADO D 1633 / D 1632 / D 2166 | ITR - 032 - 48 | Rev 00 |
|--|----------------|--------|









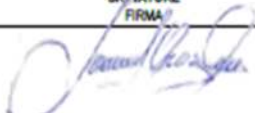
|                           |               |                                |                            |
|---------------------------|---------------|--------------------------------|----------------------------|
| WBS/AREA<br>WBS/ÁREA      | 3801          | REPORT No.                     | CI - 3801 - 032 - 48 -0003 |
| TESTED BY<br>ENSAYADO POR | Kenny Moreira | CALCULATED BY<br>CALCULADO POR | Kenny Moreira              |

| SAMPLE DESCRIPTION<br>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA         | LIMOS ARENOSO COLOR MARRON + CEMENTO 3%  |  |   |   | TYPE OF CEMENT<br>TIPO DE CEMENTO  |   | GUAPAN TIPO IP [ 3 % ]  |   |
|---|--|--|---|---|--|---|---|---|
|   | 1017   | 1018   | 1019  | 1020  | 1021   | 1022  | 1023  | 1024  |
| CYLINDER N°<br>CILINDRO N°                              |  |  |   |   |  |   |   |   |
| SAMPLING LOCATION<br>UBICACIÓN DEL MUESTREO             | TSF<br>BORROW 5<br>PROF: 30CM DE SUELO NATURAL   |  |   |   |  |   |   |   |
| MOLDING DATE<br>FECHA DE MOLDEO                         | 1-Jan-20   | 1-Jan-20   | 1-Jan-20  | 1-Jan-20  | 1-Jan-20   | 1-Jan-20  | 1-Jan-20  | 1-Jan-20  |
| TEST DATE<br>FECHA DE ENSAYO                            | 1-Jan-20   | 1-Jan-20   | 2-Jan-20  | 2-Jan-20  | 8-Jan-20   | 8-Jan-20  | 29-Jan-20   | 29-Jan-20   |
| AGE (DAYS)<br>EDAD (DÍAS)                               | INSTANTLY  | INSTANTLY  | 1   | 1   | 7  | 7   | 28  | 28  |
| DIAMETER<br>DIÁMETRO [mm]                               | 71.0   | 71.0   | 71.0  | 71.0  | 71.0   | 71.0  | 71.0  | 71.0  |
| HEIGHT<br>ALTURA [mm]                                   | 143.0  | 143.0  | 143.0   | 143.0   | 143.0  | 143.0   | 143.0   | 143.0   |
| INITIAL AREA<br>ÁREA INICIAL [mm <sup>2</sup> ]         | 3959.2   | 3959.2   | 3959.2  | 3959.2  | 3959.2   | 3959.2  | 3959.2  | 3959.2  |
| VOLUME<br>VOLUMEN [cm <sup>3</sup> ]                    | 366.2  | 366.2  | 366.2   | 366.2   | 366.2  | 366.2   | 366.2   | 366.2   |
| WEIGHT<br>PESO [gr]                                     | 1063.0   | 1064.0   | 1066.0  | 1066.0  | 1068.0   | 1068.0  | 1067.0  | 1068.0  |
| WET DENSITY<br>DENSIDAD HUMEDA [gr/cm <sup>3</sup> ]    | 1.881  | 1.879  | 1.883   | 1.883   | 1.886  | 1.886   | 1.885   | 1.886   |
| MOISTURE AFTER THE TEST<br>HUMEDAD DESPUÉS DEL TEST [%] | 29.04  | 29.04  | 29.78   | 29.78   | 28.10  | 27.73   | 30.53   | 30.15   |
| DRY DENSITY<br>DENSIDAD SECA [gr/cm <sup>3</sup> ]      | 1.458  | 1.456  | 1.451   | 1.451   | 1.473  | 1.477   | 1.444   | 1.449   |
| UNITARY DEFORMATION<br>DEFORMACIÓN UNITARIA [%]         | 2.45   | 2.45   | 3.15  | 3.15  | 2.94   | 2.52  | 2.20  | 2.08  |
| CORRECTED AREA<br>ÁREA CORREGIDA [mm <sup>2</sup> ]     | 4058.6   | 4058.6   | 4087.8  | 4087.8  | 4079.0   | 4061.4  | 4048.1  | 4043.3  |
| BREAKING LOAD<br>CARGA DE RUPTURA [N]                   | 307.8  | 296.3  | 385.3   | 372.7   | 460.6  | 424.0   | 473.2   | 421.9   |
| COMPRESSIVE STRESS<br>ESFUERZO DESVIADOR [kpa]          | 75.84  | 73.00  | 94.26   | 91.17   | 112.92   | 104.40  | 116.89  | 104.34  |
| SHEAR STRESS<br>ESFUERZO CORTANTE [kpa]                 | 54   | 52   | 94  | 94  | 144  | 138   | 152   | 150   |
| TESTED SAMPLE PICTURE<br>IMAGEN DE LA MUESTRA ENSAYADA  |                         |   |  |  |  |  |  |  |
| OBSERVATIONS<br>OBSERVACIONES                           | Humedad natural del suelo antes de mezclar con cemento 30.7%<br>Caracterización de material (Muestra 3137) |  |   |   |  |   |   |   |
| LABORATORY LEADER<br>LÍDER DE LABORATORIO               | PRINT NAME<br>NOMBRE IMPRESO   | SIGNATURE<br>FIRMA   |   |   |  | DATE<br>FECHA   |   |   |
|   | Cristian Orozco  |  |   |   |  | 29-Jan-20   |   |   |

STANDARD TEST METHOD FOR COMPRESSIVE STRENGTH OF MOLDED SOIL-CEMENT CYLINDERS D 1633 / D 1632 / D 2166  
MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE CILINDROS DE SUELO - CEMENTO MOLDEADO D 1633 / D 1632 / D 2166

ITR - 032 - 48 Rev 00

|                           |               |                                |                            |
|---------------------------|---------------|--------------------------------|----------------------------|
| WBS/AREA<br>WBS/ÁREA      | 3801          | REPORT No.                     | CI - 3801 - 032 - 48 -0004 |
| TESTED BY<br>ENSAYADO POR | Kenny Moreira | CALCULATED BY<br>CALCULADO POR | Kenny Moreira              |










| SAMPLE DESCRIPTION<br>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA         | LIMOS ARENOSO COLOR MARRON + CEMENTO 6%  |   |   |   | TYPE OF CEMENT<br>TIPO DE CEMENTO  |   | GUAPAN TIPO IP [ 6% ]   |   |                     |
|---|--|---|---|---|--|---|---|---|---------------------|
|   | CYLINDER N°<br>CILINDRO N°   | 1025  | 1026  | 1027  | 1028   | 1029  | 1030  | 1031  | 1032                |
| SAMPLING LOCATION<br>UBICACIÓN DEL MUESTREO             | TSF<br>BORROW 5<br>PROF: 30CM DE SUELO NATURAL, HIDRATADO  |   |   |   |  |   |   |   |                     |
| MOLDING DATE<br>FECHA DE MOLDEO                         | 9-Jan-20   | 9-Jan-20  | 9-Jan-20  | 9-Jan-20  | 9-Jan-20   | 9-Jan-20  | 9-Jan-20  | 9-Jan-20  | 9-Jan-20            |
| TEST DATE<br>FECHA DE ENSAYO                            | 9-Jan-20   | 9-Jan-20  | 10-Jan-20   | 10-Jan-20   | 16-Jan-20  | 16-Jan-20   | 6-Feb-20  | 6-Feb-20  | 6-Feb-20            |
| AGE (DAYS)<br>EDAD (DÍAS)                               | INSTANTLY  | INSTANTLY   | 1   | 1   | 7  | 7   | 28  | 28  | 28                  |
| DIAMETER<br>DIÁMETRO [mm]                               | 71.0   | 71.0  | 71.0  | 71.0  | 71.0   | 71.0  | 71.0  | 71.0  | 71.0                |
| HEIGHT<br>ALTURA [mm]                                   | 143.0  | 143.0   | 143.0   | 143.0   | 143.0  | 143.0   | 143.0   | 143.0   | 143.0               |
| INITIAL AREA<br>ÁREA INICIAL [mm <sup>2</sup> ]         | 3959.2   | 3959.2  | 3959.2  | 3959.2  | 3959.2   | 3959.2  | 3959.2  | 3959.2  | 3959.2              |
| VOLUME<br>VOLUMEN [cm <sup>3</sup> ]                    | 566.2  | 566.2   | 566.2   | 566.2   | 566.2  | 566.2   | 566.2   | 566.2   | 566.2               |
| WEIGHT<br>PESO [gr]                                     | 1033.0   | 1032.0  | 1028.0  | 1027.0  | 1034.0   | 1032.0  | 1030.0  | 1025.0  | 1025.0              |
| WET DENSITY<br>DENSIDAD HUMEDA [gr/cm <sup>3</sup> ]    | 1.825  | 1.823   | 1.816   | 1.814   | 1.826  | 1.823   | 1.819   | 1.810   | 1.810               |
| MOISTURE AFTER THE TEST<br>HUMEDAD DESPUÉS DEL TEST [%] | 33.29  | 33.50   | 33.12   | 33.08   | 32.38  | 32.71   | 33.62   | 33.16   | 33.16               |
| DRY DENSITY<br>DENSIDAD SECA [gr/cm <sup>3</sup> ]      | 1.369  | 1.365   | 1.364   | 1.363   | 1.380  | 1.374   | 1.361   | 1.360   | 1.360               |
| UNITARY DEFORMATION<br>DEFORMACIÓN UNITARIA [%]         | 3.36   | 3.15  | 2.73  | 2.73  | 1.33   | 1.68  | 1.82  | 1.82  | 1.82                |
| CORRECTED AREA<br>ÁREA CORREGIDA [mm <sup>2</sup> ]     | 4096.7   | 4087.8  | 4070.2  | 4070.2  | 4012.5   | 4026.8  | 4032.5  | 4032.5  | 4032.5              |
| BREAKING LOAD<br>CARGA DE RUPTURA [N]                   | 187.4  | 207.3   | 459.0   | 525.5   | 771.6  | 838.5   | 1058.4  | 1032.2  | 1032.2              |
| COMPRESSIVE STRESS<br>ESFUERZO DESVIADOR [kpa]          | 45.74  | 50.71   | 112.77  | 129.11  | 192.30   | 213.20  | 262.47  | 255.97  | 255.97              |
| SHEAR STRESS<br>ESFUERZO CORTANTE [kpa]                 | 16   | 16  | 180   | 200   | No se pudo realizar  | No se pudo realizar   | No se pudo realizar   | No se pudo realizar   | No se pudo realizar |
| TESTED SAMPLE PICTURE<br>IMAGEN DE LA MUESTRA ENSAYADA  |   |  |  |  |  |  |  |  |                     |
| OBSERVATIONS<br>OBSERVACIONES                           | Humedad natural del suelo antes de mezclar con cemento 38.05%<br>Caracterización de material (Muestra 3137)<br>Muestra natural hidratada para llegar al 38.05% de humedad, las muestras fueron remoldeadas 2 horas después de la colocación del cemento, ya que estaban muy inestable para remoldear |   |   |   |  |   |   |   |                     |
| LABORATORY LEADER<br>LÍDER DE LABORATORIO               | PRINT NAME<br>NOMBRE IMPRESO   | SIGNATURE<br>FIRMA  |   |   |  | DATE<br>FECHA   |   |   |                     |
| Cristian Orozco   |    |   |   |   | 6-Feb-20   |   |   |   |                     |

STANDARD TEST METHOD FOR COMPRESSIVE STRENGTH OF MOLDED SOIL-CEMENT CYLINDERS D 1633 / D 1632 / D 2166  
MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA LA RESISTENCIA A COMPRESION DE CILINDROS DE SUELO - CEMENTO MOLDEADO D 1633 / D 1632 / D 2166

ITR - 032 - 48

Rev 00

| WBS/AREA<br>WBS/ÁREA      | 3801          | REPORT No.                     | CI - 3801 - 032 - 48 - 0005 |
|---------------------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------|
| TESTED BY<br>ENSAYADO POR | Kenny Moreira | CALCULATED BY<br>CALCULADO POR | Kenny Moreira               |

| SAMPLE DESCRIPTION<br>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA         | LIMOS ARENOSO COLOR MARRON + CEMENTO 3%   |   |   |   | TYPE OF CEMENT<br>TIPO DE CEMENTO  |   | GUAPAN TIPO IP [ 3% ]   |   |   |
|---|---|---|---|---|--|---|---|---|---|
|   | CYLINDER N°<br>CILINDRO N°  | 1033  | 1034  | 1035  | 1036   | 1037  | 1038  | 1039  | 1040  |
| SAMPLING LOCATION<br>UBICACIÓN DEL MUESTREO             | TSF<br>BORROW 5<br>PROF: 30CM DE SUELO NATURAL, HIDRATADO                           |   |   |   |  |   |   |   |   |
| MOLDING DATE<br>FECHA DE MOLDEO                         | 15-Jan-20   | 15-Jan-20   | 15-Jan-20   | 15-Jan-20   | 15-Jan-20  | 15-Jan-20   | 15-Jan-20   | 15-Jan-20   | 15-Jan-20   |
| TEST DATE<br>FECHA DE ENSAYO                            | 15-Jan-20   | 15-Jan-20   | 16-Jan-20   | 16-Jan-20   | 22-Jan-20  | 22-Jan-20   | 12-Feb-20   | 12-Feb-20   | 12-Feb-20   |
| AGE (DAYS)<br>EDAD (DÍAS)                               | INSTANTLY   | INSTANTLY   | 1   | 1   | 7  | 7   | 28  | 28  | 28  |
| DIAMETER<br>DIÁMETRO [mm]                               | 71.0  | 71.0  | 71.0  | 71.0  | 71.0   | 71.0  | 71.0  | 71.0  | 71.0  |
| HEIGHT<br>ALTURA [mm]                                   | 143.0   | 143.0   | 143.0   | 143.0   | 143.0  | 143.0   | 143.0   | 143.0   | 143.0   |
| INITIAL AREA<br>ÁREA INICIAL [mm <sup>2</sup> ]         | 3959.2  | 3959.2  | 3959.2  | 3959.2  | 3959.2   | 3959.2  | 3959.2  | 3959.2  | 3959.2  |
| VOLUME<br>VOLUMEN [cm <sup>3</sup> ]                    | 566.2   | 566.2   | 566.2   | 566.2   | 566.2  | 566.2   | 566.2   | 566.2   | 566.2   |
| WEIGHT<br>PESO [gr]                                     | 1046.0  | 1047.0  | 1040.0  | 1041.0  | 1038.0   | 1038.0  | 1038.0  | 1034.0  | 1034.0  |
| WET DENSITY<br>DENSIDAD HUMEDA [gr/cm <sup>3</sup> ]    | 1.848   | 1.849   | 1.837   | 1.839   | 1.833  | 1.833   | 1.833   | 1.826   | 1.826   |
| MOISTURE AFTER THE TEST<br>HUMEDAD DESPUÉS DEL TEST (%) | 32.18   | 31.42   | 30.37   | 30.31   | 31.64  | 31.30   | 30.39   | 30.89   | 30.89   |
| DRY DENSITY<br>DENSIDAD SECA [gr/cm <sup>3</sup> ]      | 1.398   | 1.407   | 1.409   | 1.411   | 1.393  | 1.396   | 1.406   | 1.395   | 1.395   |
| UNITARY DEFORMATION<br>DEFORMACIÓN UNITARIA (%)         | 3.24  | 3.87  | 3.36  | 3.08  | 2.94   | 3.08  | 3.64  | 3.59  | 3.59  |
| CORRECTED AREA<br>ÁREA CORREGIDA [mm <sup>2</sup> ]     | 4178.3  | 4206.3  | 4096.7  | 4084.9  | 4079.0   | 4084.9  | 4108.6  | 4193.8  | 4193.8  |
| BREAKING LOAD<br>CARGA DE RUPTURA [N]                   | 127.7   | 124.5   | 202.0   | 213.6   | 242.9  | 190.4   | 213.6   | 167.3   | 167.3   |
| COMPRESSIVE STRESS<br>ESFUERZO DESVIADOR [kpa]          | 30.56   | 29.60   | 49.31   | 52.29   | 59.55  | 46.61   | 51.99   | 39.89   | 39.89   |
| SHEAR STRESS<br>ESFUERZO CORTANTE [kpa]                 | 10  | 12  | 32  | 32  | 40   | 42  | 58  | 56  | 56  |
| TESTED SAMPLE PICTURE<br>IMAGEN DE LA MUESTRA ENSAYADA  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

OBSERVATIONS  
OBSERVACIONES

Humedad natural del suelo antes de mezclar con cemento 34.23%  
Caracterización de material [Muestra 3137]  
Muestra natural hidratada para llegar al 34.23% de humedad, las muestras fueron remodeladas 30 minutos después de la colocación del cemento, para dejar reaccionar el cemento









| LABORATORY LEADER<br>LÍDER DE LABORATORIO | PRINT NAME<br>NOMBRE IMPRESO | SIGNATURE<br>FIRMA   | DATE<br>FECHA |
|---|------------------------------|--|---------------|
| Cristian Orozco                           |                              |  | 12-Feb-20     |

STANDARD TEST METHOD FOR COMPRESSIVE STRENGTH OF MOLDED SOIL-CEMENT CYLINDERS D 1633 / D 1632 / D 2166  
MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA LA RESISTENCIA A COMPRESION DE CILINDROS DE SUELO - CEMENTO MOLDEADO D 1633 / D 1632 / D 2166

ITR - 032 - 48 Rev 00

AREA 4 DIGIT 560

|                           |               |                                |                            |
|---------------------------|---------------|--------------------------------|----------------------------|
| WBS/AREA<br>WBS/ÁREA      | 3801          | REPORT No.                     | CI - 3801 - 032 - 48 -0002 |
| TESTED BY<br>ENSAYADO POR | Kenny Moreira | CALCULATED BY<br>CALCULADO POR | Kenny Moreira              |










| SAMPLE DESCRIPTION<br>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA         | LIMOS ARENOSO COLOR MARRON + CEMENTO 2%   |   |   |   | TYPE OF CEMENT<br>TIPO DE CEMENTO  |   | GUAPAN TIPO IP [ 2 % ]  |   |
|---|---|---|---|---|--|---|---|---|
| CYLINDER N°<br>CILINDRO N°                              | 1009  | 1010  | 1011  | 1012  | 1013   | 1014  | 1015  | 1016  |
| SAMPLING LOCATION<br>UBICACIÓN DEL MUESTREO             | TSF<br>BORROW 5<br>PROF: 30CM DE SUELO NATURAL                                      |   |   |   |  |   |   |   |
| MOLDING DATE<br>FECHA DE MOLDEO                         | 30-Dec-19   | 30-Dec-19   | 30-Dec-19   | 30-Dec-19   | 30-Dec-19  | 30-Dec-19   | 30-Dec-19   | 30-Dec-19   |
| TEST DATE<br>FECHA DE ENSAYO                            | 30-Dec-19   | 30-Dec-19   | 31-Dec-19   | 31-Dec-19   | 6-Jan-20   | 6-Jan-20  | 27-Jan-20   | 27-Jan-20   |
| AGE (DAYS)<br>EDAD (DÍAS)                               | INSTANTLY   | INSTANTLY   | 1   | 1   | 7  | 7   | 28  | 28  |
| DIAMETER<br>DIÁMETRO [mm]                               | 71.0  | 71.0  | 71.0  | 71.0  | 71.0   | 71.0  | 71.0  | 71.0  |
| HEIGHT<br>ALTURA [mm]                                   | 143.0   | 143.0   | 143.0   | 143.0   | 143.0  | 143.0   | 143.0   | 143.0   |
| INITIAL AREA<br>ÁREA INICIAL [mm <sup>2</sup> ]         | 3959.2  | 3959.2  | 3959.2  | 3959.2  | 3959.2   | 3959.2  | 3959.2  | 3959.2  |
| VOLUME<br>VOLUMEN [cm <sup>3</sup> ]                    | 366.2   | 366.2   | 366.2   | 366.2   | 366.2  | 366.2   | 366.2   | 366.2   |
| WEIGHT<br>PESO [gr]                                     | 1062.0  | 1064.0  | 1062.0  | 1061.0  | 1067.0   | 1067.0  | 1067.0  | 1067.0  |
| WET DENSITY<br>DENSIDAD HUMEDA [gr/cm <sup>3</sup> ]    | 1.876   | 1.879   | 1.876   | 1.874   | 1.885  | 1.885   | 1.885   | 1.885   |
| MOISTURE AFTER THE TEST<br>HUMEDAD DESPUÉS DEL TEST (%) | 29.22   | 29.22   | 29.22   | 29.22   | 28.60  | 28.30   | 30.64   | 30.95   |
| DRY DENSITY<br>DENSIDAD SECA [gr/cm <sup>3</sup> ]      | 1.452   | 1.454   | 1.452   | 1.450   | 1.465  | 1.469   | 1.443   | 1.439   |
| UNITARY DEFORMATION<br>DEFORMACIÓN UNITARIA (%)         | 3.50  | 3.50  | 4.55  | 4.55  | 4.48   | 3.15  | 3.99  | 2.94  |
| CORRECTED AREA<br>ÁREA CORREGIDA [mm <sup>2</sup> ]     | 4102.8  | 4102.8  | 4147.7  | 4147.7  | 4144.7   | 4087.8  | 4123.6  | 4079.0  |
| BREAKING LOAD<br>CARGA DE RUPTURA [N]                   | 202.0   | 209.4   | 238.7   | 221.9   | 274.3  | 275.3   | 275.3   | 241.8   |
| COMPRESSIVE STRESS<br>ESFUERZO DESVIADOR [kpa]          | 49.23   | 51.04   | 57.55   | 53.50   | 66.18  | 67.35   | 66.76   | 59.28   |
| SHEAR STRESS<br>ESFUERZO CORTANTE [kpa]                 | 36  | 34  | 42  | 44  | 56   | 58  | 52  | 54  |
| TESTED SAMPLE PICTURE<br>IMAGEN DE LA MUESTRA ENSAYADA  |  |  |  |  |  |  |  |  |

OBSERVATIONS  
OBSERVACIONES

Humedad natural del suelo antes de mezclar con cemento 30.7%  
Caracterización de material (Muestra 3137)

|   |   |  |                            |
|---|---|--|----------------------------|
| LABORATORY LEADER<br>LÍDER DE LABORATORIO | PRINT NAME<br>NOMBRE IMPRESO<br>Cristian Orozco | SIGNATURE<br>FIRMA<br> | DATE<br>FECHA<br>27-Jan-20 |
|---|---|--|----------------------------|

## Borrow 4 - Ensayos

| AURELIAN<br>ECUADOR S.A.   |  | FRUTA DEL NORTE PROJECT QUALITY DOCUMENTATION<br>PROYECTO FRUTA DEL NORTE DOCUMENTACIÓN DE CALIDAD          |   |   |  |  |   |   |   |
|--|--|---|---|---|--|--|---|---|---|
| STANDARD TEST METHOD FOR COMPRESSIVE STRENGTH OF MOLDED SOIL-CEMENT CYLINDERS D 1633 / D 1632 / D 2166<br>MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE CILINDROS DE SUELO - CEMENTO MOLDEADO D 1633 / D 1632 / D 2166 |  |   |   |   |  |  | ITR - 032 - 48  |   | Rev 00  |
| WBS/AREA<br>WBS/ÁREA   |  | 3801  |   | REPORT No.  |  | CI - 3801 - 032 - 48 - 0011  |   |   |   |
| TESTED BY<br>ENSAYADO POR  |  | Kenny Moreira   |   | CALCULATED BY<br>CALCULADO POR  |  | Kenny Moreira  |   |   |   |
| SAMPLE DESCRIPTION<br>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA  |  | ARCILLA ARENOSA COLOR CAFÉ CLARO + CEMENTO 3%   |   |   |  | TYPE OF CEMENT<br>TIPO DE CEMENTO  |   | GUAPAN TIPO IP [ 3 % ]  |   |
| CYLINDER N°<br>CILINDRO N°   |  | 1081  | 1082  | 1083  | 1084   | 1085   | 1086  | 1087  | 1088  |
| SAMPLING LOCATION<br>UBICACIÓN DEL MUESTREO  |  | TSF<br>BORROW 4<br>PROF: 30 CM DE SUELO NATURAL   |   |   |  |  |   |   |   |
| MOLDING DATE<br>FECHA DE MOLDEO  |  | 10-Feb-20   | 10-Feb-20   | 10-Feb-20   | 10-Feb-20  | 10-Feb-20  | 10-Feb-20   | 10-Feb-20   | 10-Feb-20   |
| TEST DATE<br>FECHA DE ENSAYO   |  | 10-Feb-20   | 10-Feb-20   | 11-Feb-20   | 11-Feb-20  | 17-Feb-20  | 17-Feb-20   | 9-Mar-20  | 9-Mar-20  |
| AGE (DAYS)<br>EDAD (DÍAS)  |  | INSTANTLY   | INSTANTLY   | 1   | 1  | 7  | 7   | 28  | 28  |
| DIAMETER<br>DIÁMETRO [mm]  |  | 71.0  | 71.0  | 71.0  | 71.0   | 71.0   | 71.0  | 71.0  | 71.0  |
| HEIGHT<br>ALTURA [mm]  |  | 143.0   | 143.0   | 143.0   | 143.0  | 143.0  | 143.0   | 143.0   | 143.0   |
| INITIAL AREA<br>ÁREA INICIAL [mm <sup>2</sup> ]  |  | 3959.2  | 3959.2  | 3959.2  | 3959.2   | 3959.2   | 3959.2  | 3959.2  | 3959.2  |
| VOLUME<br>VOLUMEN [cm <sup>3</sup> ]   |  | 566.2   | 566.2   | 566.2   | 566.2  | 566.2  | 566.2   | 566.2   | 566.2   |
| WEIGHT<br>PESO [gr]  |  | 1001.0  | 1002.0  | 1000.0  | 1001.0   | 1001.0   | 1002.0  | 998.0   | 998.0   |
| WET DENSITY<br>DENSIDAD HUMEDA [gr/cm <sup>3</sup> ]   |  | 1.768   | 1.770   | 1.766   | 1.768  | 1.768  | 1.770   | 1.763   | 1.763   |
| MOISTURE AFTER THE TEST<br>HUMEDAD DESPUÉS DEL TEST [%]  |  | 36.44   | 36.91   | 36.89   | 36.79  | 36.23  | 35.51   | 36.00   | 35.29   |
| DRY DENSITY<br>DENSIDAD SECA [gr/cm <sup>3</sup> ]   |  | 1.296   | 1.293   | 1.290   | 1.293  | 1.298  | 1.306   | 1.296   | 1.303   |
| UNITARY DEFORMATION<br>DEFORMACIÓN UNITARIA [%]  |  | 5.87  | 3.64  | 3.64  | 2.24   | 2.52   | 2.80  | 2.10  | 2.10  |
| CORRECTED AREA<br>ÁREA CORREGIDA [mm <sup>2</sup> ]  |  | 4206.3  | 4108.6  | 4108.6  | 4049.8   | 4061.4   | 4073.1  | 4044.0  | 4044.0  |
| BREAKING LOAD<br>CARGA DE RUPTURA [N]  |  | 172.7   | 191.6   | 294.5   | 304.6  | 331.7  | 349.9   | 341.0   | 347.0   |
| COMPRESSIVE STRESS<br>ESFUERZO DESVIADOR [kpa]   |  | 41.06   | 46.63   | 71.68   | 75.21  | 81.67  | 85.90   | 84.32   | 85.81   |
| SHEAR STRESS<br>ESFUERZO CORTANTE [kpa]  |  | 32  | 32  | 90  | 96   | 116  | 118   | 134   | 142   |
| TESTED SAMPLE PICTURE<br>IMAGEN DE LA MUESTRA ENSAYADA   |  |                          |  |  |                         |  |  |  |  |
| OBSERVATIONS<br>OBSERVACIONES  |  | Humedad natural del suelo antes de mezclar con cemento 37.74%<br>Caracterización de material (Muestra 3139) |   |   |  |  |   |   |   |
| LABORATORY LEADER<br>LÍDER DE LABORATORIO  |  | PRINT NAME<br>NOMBRE IMPRESO<br>Cristian Orozco   |   |   | SIGNATURE<br>FIRMA<br> |  |   | DATE<br>FECHA<br>9-Mar-20   |   |

STANDARD TEST METHOD FOR COMPRESSIVE STRENGTH OF MOLDED SOIL-CEMENT CYLINDERS D 1633 / D 1632 / D 2166  
 MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE CILINDROS DE SUELO - CEMENTO MOLDEADO D 1633 / D 1632 / D 2166

ITR - 032 - 48 Rev 00

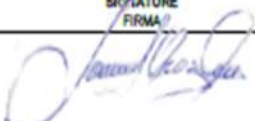
AREA 4 DIGIT 502

|                           |               |                                |                             |
|---------------------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------|
| WBS/AREA<br>WBS/ÁREA      | 3801          | REPORT No.                     | CI - 3801 - 032 - 48 - 0010 |
| TESTED BY<br>ENSAYADO POR | Kenny Moreira | CALCULATED BY<br>CALCULADO POR | Kenny Moreira               |

| SAMPLE DESCRIPTION<br>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA         | ARCILLA ARENOSA COLOR CAFÉ CLARO + CEMENTO 2%   |           |           |           |           | TYPE OF CEMENT<br>TIPO DE CEMENTO |          | GUAPAN TIPO IP [ 2 % ] |          |
|---|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------------------------|----------|------------------------|----------|
| CYLINDER N°<br>CILINDRO N°                              | 1073  | 1074      | 1075      | 1076      | 1077      | 1078                              | 1079     | 1080                   |          |
| SAMPLING LOCATION<br>UBICACIÓN DEL MUESTREO             | TSF<br>BORROW 4<br>PROF: 30 CM DE SUELO NATURAL |           |           |           |           |                                   |          |                        |          |
| MOLDING DATE<br>FECHA DE MOLDEO                         | 9-Feb-20  | 9-Feb-20  | 9-Feb-20  | 9-Feb-20  | 9-Feb-20  | 9-Feb-20                          | 9-Feb-20 | 9-Feb-20               | 9-Feb-20 |
| TEST DATE<br>FECHA DE ENSAYO                            | 9-Feb-20  | 9-Feb-20  | 10-Feb-20 | 10-Feb-20 | 16-Feb-20 | 16-Feb-20                         | 8-Mar-20 | 8-Mar-20               | 8-Mar-20 |
| AGE (DAYS)<br>EDAD (DÍAS)                               | INSTANTLY                                       | INSTANTLY | 1         | 1         | 7         | 7                                 | 28       | 28                     | 28       |
| DIAMETER<br>DIÁMETRO [mm]                               | 71.0  | 71.0      | 71.0      | 71.0      | 71.0      | 71.0                              | 71.0     | 71.0                   | 71.0     |
| HEIGHT<br>ALTURA [mm]                                   | 143.0   | 143.0     | 143.0     | 143.0     | 143.0     | 143.0                             | 143.0    | 143.0                  | 143.0    |
| INITIAL AREA<br>ÁREA INICIAL [mm <sup>2</sup> ]         | 3959.2  | 3959.2    | 3959.2    | 3959.2    | 3959.2    | 3959.2                            | 3959.2   | 3959.2                 | 3959.2   |
| VOLUME<br>VOLUMEN [cm <sup>3</sup> ]                    | 566.2   | 566.2     | 566.2     | 566.2     | 566.2     | 566.2                             | 566.2    | 566.2                  | 566.2    |
| WEIGHT<br>PESO [gr]                                     | 1000.0  | 1002.0    | 999.0     | 1000.0    | 999.0     | 999.0                             | 994.0    | 998.0                  | 998.0    |
| WET DENSITY<br>DENSIDAD HUMEDA [gr/cm <sup>3</sup> ]    | 1.766   | 1.770     | 1.765     | 1.766     | 1.765     | 1.765                             | 1.756    | 1.763                  | 1.763    |
| MOISTURE AFTER THE TEST<br>HUMEDAD DESPUÉS DEL TEST [%] | 37.31   | 37.07     | 36.62     | 37.52     | 37.32     | 37.29                             | 36.14    | 36.36                  | 36.36    |
| DRY DENSITY<br>DENSIDAD SECA [gr/cm <sup>3</sup> ]      | 1.286   | 1.291     | 1.292     | 1.284     | 1.285     | 1.285                             | 1.290    | 1.293                  | 1.293    |
| UNITARY DEFORMATION<br>DEFORMACIÓN UNITARIA [%]         | 5.87  | 6.43      | 4.76      | 5.87      | 5.31      | 4.48                              | 5.03     | 5.03                   | 5.03     |
| CORRECTED AREA<br>ÁREA CORREGIDA [mm <sup>2</sup> ]     | 4206.3  | 4231.4    | 4156.9    | 4206.3    | 4181.4    | 4144.7                            | 4169.1   | 4169.1                 | 4169.1   |
| BREAKING LOAD<br>CARGA DE RUPTURA [N]                   | 154.9   | 157.0     | 211.5     | 201.0     | 211.5     | 196.9                             | 240.0    | 220.8                  | 220.8    |
| COMPRESSIVE STRESS<br>ESFUERZO DESVIADOR [kpa]          | 36.83   | 37.10     | 50.88     | 47.79     | 50.58     | 47.51                             | 57.57    | 52.96                  | 52.96    |
| SHEAR STRESS<br>ESFUERZO CORTANTE [kpa]                 | 20  | 22        | 38        | 40        | 56        | 54                                | 68       | 70                     | 70       |

|  |   |   |   |   |  |   |   |   |
|--|---|---|---|---|--|---|---|---|
| TESTED SAMPLE PICTURE<br>IMAGEN DE LA MUESTRA ENSAYADA |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--|---|---|---|---|--|---|---|---|









|                               |   |
|-------------------------------|---|
| OBSERVATIONS<br>OBSERVACIONES | Humedad natural del suelo antes de mezclar con cemento 37.74%<br>Caracterización de material (Muestra 3139) |
|-------------------------------|---|

|   |   |  |                           |
|---|---|--|---------------------------|
| LABORATORY LEADER<br>LÍDER DE LABORATORIO | PRINT NAME<br>NOMBRE IMPRESO<br>Cristian Orozco | SIGNATURE<br>FIRMA<br> | DATE<br>FECHA<br>8-Mar-20 |
|---|---|--|---------------------------|

STANDARD TEST METHOD FOR COMPRESSIVE STRENGTH OF MOLDED SOIL-CEMENT CYLINDERS D 1633 / D 1632 / D 2166  
MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE CILINDROS DE SUELO - CEMENTO MOLDEADO D 1633 / D 1632 / D 2166

ITR - 032 - 48 Rev 00

|                           |               |                                |                             |
|---------------------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------|
| WBS/AREA<br>WBS/ÁREA      | 3301          | REPORT No.                     | CI - 3801 - 032 - 48 - 0009 |
| TESTED BY<br>ENSAYADO POR | Kenny Moreira | CALCULATED BY<br>CALCULADO POR | Kenny Moreira               |









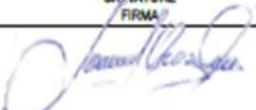
| SAMPLE DESCRIPTION<br>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA         | ARCILLA ARENOSA COLOR CAFÉ CLARO + CEMENTO 1%                                       |   |   |   | TYPE OF CEMENT<br>TIPO DE CEMENTO  |   | GUAPAN TIPO IP [1%]   |   |
|---|---|---|---|---|--|---|---|---|
|   | 1065  | 1066  | 1067  | 1068  | 1069   | 1070  | 1071  | 1072  |
| CYLINDER N°<br>CILINDRO N°                              |   |   |   |   |  |   |   |   |
| SAMPLING LOCATION<br>UBICACIÓN DEL MUESTREO             | TSF<br>BORROW 4<br>PROF: 30 CM DE SUELO NATURAL                                     |   |   |   |  |   |   |   |
| MOLDING DATE<br>FECHA DE MOLDEO                         | 8-Feb-20  | 8-Feb-20  | 8-Feb-20  | 8-Feb-20  | 8-Feb-20   | 8-Feb-20  | 8-Feb-20  | 8-Feb-20  |
| TEST DATE<br>FECHA DE ENGAYO                            | 8-Feb-20  | 8-Feb-20  | 9-Feb-20  | 9-Feb-20  | 15-Feb-20  | 15-Feb-20   | 7-Mar-20  | 7-Mar-20  |
| AGE (DAYS)<br>EDAD (DÍAS)                               | INSTANTLY   | INSTANTLY   | 1   | 1   | 7  | 7   | 28  | 28  |
| DIAMETER<br>DIÁMETRO [mm]                               | 71.0  | 71.0  | 71.0  | 71.0  | 71.0   | 71.0  | 71.0  | 71.0  |
| HEIGHT<br>ALTURA [mm]                                   | 143.0   | 143.0   | 143.0   | 143.0   | 143.0  | 143.0   | 143.0   | 143.0   |
| INITIAL AREA<br>ÁREA INICIAL [mm <sup>2</sup> ]         | 3959.2  | 3959.2  | 3959.2  | 3959.2  | 3959.2   | 3959.2  | 3959.2  | 3959.2  |
| VOLUME<br>VOLUMEN [cm <sup>3</sup> ]                    | 566.2   | 566.2   | 566.2   | 566.2   | 566.2  | 566.2   | 566.2   | 566.2   |
| WEIGHT<br>PESO [gr]                                     | 997.0   | 998.0   | 998.0   | 999.0   | 996.0  | 994.0   | 991.0   | 993.0   |
| WET DENSITY<br>DENSIDAD HUMEDA [gr/cm <sup>3</sup> ]    | 1.761   | 1.763   | 1.763   | 1.765   | 1.759  | 1.756   | 1.750   | 1.754   |
| MOISTURE AFTER THE TEST<br>HUMEDAD DESPUÉS DEL TEST [%] | 37.23   | 37.21   | 37.43   | 37.20   | 36.99  | 36.94   | 37.36   | 37.87   |
| DRY DENSITY<br>DENSIDAD SECA [gr/cm <sup>3</sup> ]      | 1.283   | 1.285   | 1.283   | 1.286   | 1.284  | 1.282   | 1.274   | 1.272   |
| UNITARY DEFORMATION<br>DEFORMACIÓN UNITARIA [%]         | 5.31  | 5.87  | 5.59  | 6.71  | 6.99   | 7.55  | 7.69  | 6.29  |
| CORRECTED AREA<br>ÁREA CORREGIDA [mm <sup>2</sup> ]     | 4181.4  | 4206.3  | 4193.8  | 4244.1  | 4256.9   | 4282.6  | 4289.1  | 4225.1  |
| BREAKING LOAD<br>CARGA DE RUPTURA [N]                   | 100.5   | 109.0   | 121.4   | 146.6   | 127.7  | 129.8   | 163.3   | 142.4   |
| COMPRESSIVE STRESS<br>ESFUERZO DESVIADOR [kpa]          | 24.03   | 25.91   | 28.95   | 34.54   | 30.00  | 30.31   | 38.07   | 33.70   |
| SHEAR STRESS<br>ESFUERZO CORTANTE [kpa]                 | 14  | 14  | 22  | 20  | 28   | 28  | 32  | 36  |
| TESTED SAMPLE PICTURE<br>IMAGEN DE LA MUESTRA ENSAYADA  |  |  |  |  |  |  |  |  |

OBSERVATIONS  
OBSERVACIONES

Humedad natural del suelo antes de mezclar con cemento 37.74%  
Caracterización de material (Muestra 3139)









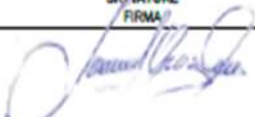
|   |   |  |                           |
|---|---|--|---------------------------|
| LABORATORY LEADER<br>LÍDER DE LABORATORIO | PRINT NAME<br>NOMBRE IMPRESO<br>Cristian Orozco | SIGNATURE<br>FIRMA<br> | DATE<br>FECHA<br>7-Mar-20 |
|---|---|--|---------------------------|

## Borrow 2 - Ensayos

| AURELIAN<br>ECUADOR S.A.   |  | FRUTA DEL NORTE PROJECT QUALITY DOCUMENTATION<br>PROYECTO FRUTA DEL NORTE DOCUMENTACIÓN DE CALIDAD          |   |   |  |  |   |   |   |
|--|--|---|---|---|--|--|---|---|---|
| STANDARD TEST METHOD FOR COMPRESSIVE STRENGTH OF MOLDED SOIL-CEMENT CYLINDERS D 1633 / D 1632 / D 2166<br>MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA LA RESISTENCIA A COMPRESION DE CILINDROS DE SUELO - CEMENTO MOLDEADO D 1633 / D 1632 / D 2166 |  |   |   |   |  |  | RTR - 032 - 48  |   | Rev 00  |
| WBS/AREA<br>WBS/ÁREA   |  | 3301  |   | REPORT No.  |  | CI - 3301 - 032 - 48 -0008   |   |   |   |
| TESTED BY<br>ENSAYADO POR  |  | Kenny Moreira   |   | CALCULATED BY<br>CALCULADO POR  |  | Kenny Moreira  |   |   |   |
| SAMPLE DESCRIPTION<br>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA  |  | LIMO ARENOSO COLOR CAFÉ ROJO/20 + CEMENTO 3%  |   |   |  | TYPE OF CEMENT<br>TIPO DE CEMENTO  |   | GUAPAN TIPO IP [ 3% ]   |   |
| CYLINDER N°<br>CILINDRO N°   |  | 1057  | 1058  | 1059  | 1060   | 1061   | 1062  | 1063  | 1064  |
| SAMPLING LOCATION<br>UBICACIÓN DEL MUESTREO  |  | TSF<br>BORROW 2<br>PROF: 40CM DE SUELO NATURAL  |   |   |  |  |   |   |   |
| MOLDING DATE<br>FECHA DE MOLDEO  |  | 30-Jan-20   | 30-Jan-20   | 30-Jan-20   | 30-Jan-20  | 30-Jan-20  | 30-Jan-20   | 30-Jan-20   | 30-Jan-20   |
| TEST DATE<br>FECHA DE ENSAYO   |  | 30-Jan-20   | 30-Jan-20   | 31-Jan-20   | 31-Jan-20  | 6-Feb-20   | 6-Feb-20  | 27-Feb-20   | 27-Feb-20   |
| AGE (DAYS)<br>EDAD (DÍAS)  |  | INSTANTLY   | INSTANTLY   | 1   | 1  | 7  | 7   | 28  | 28  |
| DIAMETER<br>DIÁMETRO [mm]  |  | 71.0  | 71.0  | 71.0  | 71.0   | 71.0   | 71.0  | 71.0  | 71.0  |
| HEIGHT<br>ALTURA [mm]  |  | 143.0   | 143.0   | 143.0   | 143.0  | 143.0  | 143.0   | 143.0   | 143.0   |
| INITIAL AREA<br>ÁREA INICIAL [mm <sup>2</sup> ]  |  | 3959.2  | 3959.2  | 3959.2  | 3959.2   | 3959.2   | 3959.2  | 3959.2  | 3959.2  |
| VOLUME<br>VOLUMEN [cm <sup>3</sup> ]   |  | 566.2   | 566.2   | 566.2   | 566.2  | 566.2  | 566.2   | 566.2   | 566.2   |
| WEIGHT<br>PESO [gr]  |  | 1039.0  | 1040.0  | 1038.0  | 1040.0   | 1039.0   | 1038.0  | 1037.0  | 1037.0  |
| WET DENSITY<br>DENSIDAD HUMEDA [gr/cm <sup>3</sup> ]   |  | 1.835   | 1.837   | 1.833   | 1.837  | 1.835  | 1.833   | 1.832   | 1.832   |
| MOISTURE AFTER THE TEST<br>HUMEDAD DESPUÉS DEL TEST (%)  |  | 33.06   | 33.67   | 31.35   | 31.53  | 32.43  | 32.29   | 32.32   | 31.89   |
| DRY DENSITY<br>DENSIDAD SECA [gr/cm <sup>3</sup> ]   |  | 1.379   | 1.374   | 1.396   | 1.397  | 1.386  | 1.386   | 1.384   | 1.389   |
| UNITARY DEFORMATION<br>DEFORMACIÓN UNITARIA (%)  |  | 3.50  | 3.36  | 3.50  | 2.80   | 2.52   | 2.52  | 2.38  | 2.80  |
| CORRECTED AREA<br>ÁREA CORREGIDA [mm <sup>2</sup> ]  |  | 4102.6  | 4096.7  | 4102.6  | 4073.1   | 4061.4   | 4061.4  | 4055.6  | 4073.1  |
| BREAKING LOAD<br>CARGA DE RUPTURA [N]  |  | 415.6   | 361.2   | 413.5   | 354.9  | 401.6  | 443.9   | 406.2   | 446.0   |
| COMPRESSIVE STRESS<br>ESFUERZO DESVIADOR [kpa]   |  | 101.30  | 88.17   | 100.79  | 87.13  | 98.88  | 109.30  | 100.16  | 109.50  |
| SHEAR STRESS<br>ESFUERZO CORTANTE [kpa]  |  | 148   | 152   | 150   | 152  | 154  | 156   | 152   | 156   |
| TESTED SAMPLE PICTURE<br>IMAGEN DE LA MUESTRA ENSAYADA   |  |                          |  |  |                         |  |  |  |  |
| OBSERVATIONS<br>OBSERVACIONES  |  | Humedad natural del suelo antes de mezclar con cemento 33.24%<br>Caracterización de material (Muestra 3138) |   |   |  |  |   |   |   |
| LABORATORY LEADER<br>LÍDER DE LABORATORIO  |  | PRINT NAME<br>NOMBRE IMPRESO<br>Cristian Orozco   |   |   | SIGNATURE<br>FIRMA<br> |  |   | DATE<br>FECHA<br>27-Feb-20  |   |

|  |                |        |
|--|----------------|--------|
| STANDARD TEST METHOD FOR COMPRESSIVE STRENGTH OF MOLDED SOIL-CEMENT CYLINDERS D 1633 / D 1632 / D 2166<br>MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE CILINDROS DE SUELO - CEMENTO MOLDEADO D 1633 / D 1632 / D 2166 | ITR - 032 - 48 | Rev 00 |
|--|----------------|--------|

|                           |               |                                |                            |
|---------------------------|---------------|--------------------------------|----------------------------|
| WBS/AREA<br>WBS/ÁREA      | 3801          | REPORT No.                     | CI - 3801 - 032 - 48 -0007 |
| TESTED BY<br>ENSAYADO POR | Kenny Moreira | CALCULATED BY<br>CALCULADO POR | Kenny Moreira              |










| SAMPLE DESCRIPTION<br>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA         | LIMO ARENOSO COLOR CAFÉ ROJIZO + CEMENTO 2%   |   |  |   | TYPE OF CEMENT<br>TIPO DE CEMENTO  |   | GUAPAN TIPO IP [ 2 % ]  |   |
|---|---|---|--|---|--|---|---|---|
| CYLINDER N°<br>CILINDRO N°                              | 1049  | 1050  | 1051   | 1052  | 1053   | 1054  | 1055  | 1056  |
| SAMPLING LOCATION<br>UBICACIÓN DEL MUESTREO             | TSF<br>BORROW 2<br>PROF: 40CM DE SUELO NATURAL  |   |  |   |  |   |   |   |
| MOLDING DATE<br>FECHA DE MOLDEO                         | 28-Jan-20   | 28-Jan-20   | 28-Jan-20  | 28-Jan-20   | 28-Jan-20  | 28-Jan-20   | 28-Jan-20   | 28-Jan-20   |
| TEST DATE<br>FECHA DE ENSAYO                            | 28-Jan-20   | 28-Jan-20   | 29-Jan-20  | 29-Jan-20   | 4-Feb-20   | 4-Feb-20  | 25-Feb-20   | 25-Feb-20   |
| AGE (DAYS)<br>EDAD (DÍAS)                               | INSTANTLY   | INSTANTLY   | 1  | 1   | 7  | 7   | 28  | 28  |
| DIAMETER<br>DIÁMETRO [mm]                               | 71.0  | 71.0  | 71.0   | 71.0  | 71.0   | 71.0  | 71.0  | 71.0  |
| HEIGHT<br>ALTURA [mm]                                   | 143.0   | 143.0   | 143.0  | 143.0   | 143.0  | 143.0   | 143.0   | 143.0   |
| INITIAL AREA<br>ÁREA INICIAL [mm <sup>2</sup> ]         | 3959.2  | 3959.2  | 3959.2   | 3959.2  | 3959.2   | 3959.2  | 3959.2  | 3959.2  |
| VOLUME<br>VOLUMEN [cm <sup>3</sup> ]                    | 566.2   | 566.2   | 566.2  | 566.2   | 566.2  | 566.2   | 566.2   | 566.2   |
| WEIGHT<br>PESO [gr]                                     | 1038.0  | 1038.0  | 1038.0   | 1039.0  | 1039.0   | 1041.0  | 1034.0  | 1035.0  |
| WET DENSITY<br>DENSIDAD HUMEDA [gr/cm <sup>3</sup> ]    | 1.833   | 1.833   | 1.833  | 1.833   | 1.835  | 1.839   | 1.826   | 1.828   |
| MOISTURE AFTER THE TEST<br>HUMEDAD DESPUÉS DEL TEST [%] | 33.90   | 33.81   | 33.34  | 33.25   | 33.69  | 33.57   | 32.77   | 32.78   |
| DRY DENSITY<br>DENSIDAD SECA [gr/cm <sup>3</sup> ]      | 1.373   | 1.370   | 1.375  | 1.377   | 1.373  | 1.377   | 1.376   | 1.377   |
| UNITARY DEFORMATION<br>DEFORMACIÓN UNITARIA [%]         | 3.15  | 3.64  | 3.57   | 3.57  | 2.38   | 2.66  | 2.66  | 2.52  |
| CORRECTED AREA<br>ÁREA CORREGIDA [mm <sup>2</sup> ]     | 4087.8  | 4108.6  | 4105.6   | 4105.6  | 4055.6   | 4067.3  | 4067.3  | 4061.4  |
| BREAKING LOAD<br>CARGA DE RUPTURA [N]                   | 277.4   | 284.8   | 313.0  | 345.5   | 266.8  | 308.8   | 297.3   | 363.3   |
| COMPRESSIVE STRESS<br>ESFUERZO DESVIADOR [kpa]          | 67.86   | 69.32   | 76.24  | 84.15   | 65.79  | 75.92   | 73.10   | 89.45   |
| SHEAR STRESS<br>ESFUERZO CORTANTE [kpa]                 | 68  | 66  | 78   | 80  | 110  | 108   | 108   | 116   |
| TESTED SAMPLE PICTURE<br>IMAGEN DE LA MUESTRA ENSAYADA  |                          |  |                         |  |  |  |  |  |
| OBSERVATIONS<br>OBSERVACIONES                           | Humedad natural del suelo antes de mezclar con cemento 33.24%<br>Caracterización de material (Muestra 3138) |   |  |   |  |   |   |   |
| LABORATORY LEADER<br>LÍDER DE LABORATORIO               | PRINT NAME<br>NOMBRE IMPRESO<br>Cristian Orozco   |   | SIGNATURE<br>FIRMA<br> |   |  | DATE<br>FECHA<br>25-Feb-20  |   |   |

STANDARD TEST METHOD FOR COMPRESSIVE STRENGTH OF MOLDED SOIL-CEMENT CYLINDERS D 1633 / D 1632 / D 2166  
 MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE CILINDROS DE SUELO - CEMENTO MOLDEADO D 1633 / D 1632 / D 2166



ITR - 032 - 48 Rev 00

AREA 4 DIGIT 580

|                           |               |                                |                            |
|---------------------------|---------------|--------------------------------|----------------------------|
| WBS/AREA<br>WBS/ÁREA      | 3801          | REPORT No.                     | CI - 3801 - 032 - 48 -0006 |
| TESTED BY<br>ENSAYADO POR | Kenny Moreira | CALCULATED BY<br>CALCULADO POR | Kenny Moreira              |

| SAMPLE DESCRIPTION<br>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA         | LIMO ARENOSO COLOR CAFÉ ROJIZO + CEMENTO 1%   |  |   |   | TYPE OF CEMENT<br>TIPO DE CEMENTO  |   | GUAPAN TIPO IP [1%]   |   |
|---|---|--|---|---|--|---|---|---|
| CYLINDER N°<br>CILINDRO N°                              | 1041  | 1042   | 1043  | 1044  | 1045   | 1046  | 1047  | 1048  |
| SAMPLING LOCATION<br>UBICACIÓN DEL MUESTREO             | TSF<br>BORROW 2<br>PROF: 40CM DE SUELO NATURAL  |  |   |   |  |   |   |   |
| MOLDING DATE<br>FECHA DE MOLDEO                         | 26-Jan-20   | 26-Jan-20  | 26-Jan-20   | 26-Jan-20   | 26-Jan-20  | 26-Jan-20   | 26-Jan-20   | 26-Jan-20   |
| TEST DATE<br>FECHA DE ENGAYO                            | 26-Jan-20   | 26-Jan-20  | 27-Jan-20   | 27-Jan-20   | 2-Feb-20   | 2-Feb-20  | 23-Feb-20   | 23-Feb-20   |
| AGE (DAYS)<br>EDAD (DÍAS)                               | INSTANTLY   | INSTANTLY  | 1   | 1   | 7  | 7   | 28  | 28  |
| DIAMETER<br>DIÁMETRO [mm]                               | 71.0  | 71.0   | 71.0  | 71.0  | 71.0   | 71.0  | 71.0  | 71.0  |
| HEIGHT<br>ALTURA [mm]                                   | 143.0   | 143.0  | 143.0   | 143.0   | 143.0  | 143.0   | 143.0   | 143.0   |
| INITIAL AREA<br>ÁREA INICIAL [mm <sup>2</sup> ]         | 3959.2  | 3959.2   | 3959.2  | 3959.2  | 3959.2   | 3959.2  | 3959.2  | 3959.2  |
| VOLUME<br>VOLUMEN [cm <sup>3</sup> ]                    | 566.2   | 566.2  | 566.2   | 566.2   | 566.2  | 566.2   | 566.2   | 566.2   |
| WEIGHT<br>PESO [gr]                                     | 1038.0  | 1038.0   | 1037.0  | 1036.0  | 1036.0   | 1038.0  | 1036.0  | 1038.0  |
| WET DENSITY<br>DENSIDAD HUMEDA [gr/cm <sup>3</sup> ]    | 1.833   | 1.833  | 1.832   | 1.830   | 1.830  | 1.833   | 1.830   | 1.833   |
| MOISTURE AFTER THE TEST<br>HUMEDAD DESPUÉS DEL TEST [%] | 33.24   | 33.16  | 32.79   | 32.00   | 33.30  | 32.96   | 33.78   | 33.89   |
| DRY DENSITY<br>DENSIDAD SECA [gr/cm <sup>3</sup> ]      | 1.376   | 1.377  | 1.379   | 1.386   | 1.373  | 1.379   | 1.368   | 1.369   |
| UNITARY DEFORMATION<br>DEFORMACIÓN UNITARIA [%]         | 4.20  | 3.99   | 4.20  | 3.57  | 4.20   | 4.41  | 3.99  | 4.41  |
| CORRECTED AREA<br>ÁREA CORREGIDA [mm <sup>2</sup> ]     | 4132.6  | 4123.6   | 4132.6  | 4105.6  | 4132.6   | 4141.7  | 4123.6  | 4141.7  |
| BREAKING LOAD<br>CARGA DE RUPTURA [N]                   | 233.5   | 247.1  | 246.0   | 277.4   | 263.8  | 268.0   | 243.9   | 243.9   |
| COMPRESSIVE STRESS<br>ESFUERZO DESVIADOR [kpa]          | 56.50   | 59.92  | 59.53   | 67.57   | 63.83  | 64.71   | 59.15   | 58.89   |
| SHEAR STRESS<br>ESFUERZO CORTANTE [kpa]                 | 44  | 46   | 56  | 58  | 72   | 70  | 76  | 72  |
| TESTED SAMPLE PICTURE<br>IMAGEN DE LA MUESTRA ENSAYADA  |                          |   |  |  |  |  |  |  |
| OBSERVATIONS<br>OBSERVACIONES                           | Humedad natural del suelo antes de mezclar con cemento 33.24%<br>Caracterización de material (Muestra 3138) |  |   |   |  |   |   |   |
| LABORATORY LEADER<br>LÍDER DE LABORATORIO               | PRINT NAME<br>NOMBRE IMPRESO  | SIGNATURE<br>FIRMA   |   |   |  | DATE<br>FECHA   |   |   |
|   | Cristian Orozco   |  |   |   |  | 23-Feb-20   |   |   |

Caracterización Zona 1 (M 3137)

|    |       | FRUTA DEL NORTE PROJECT QUALITY DOCUMENTATION<br>PROYECTO FRUTA DEL NORTE DOCUMENTACIÓN DE CALIDAD |  |   |                              |                             |   |   |   |       |       |   |       |       |   |      |      |   |       |       |  |       |       |   |      |      |
|---|-------|--|--|---|------------------------------|-----------------------------|---|---|---|-------|-------|---|-------|-------|---|------|------|---|-------|-------|--|-------|-------|---|------|------|
| DETERMINATION OF THE HUMIDITY CONTENT - ASTM D 2216<br>DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD - ASTM D 2216   |       | ITR - 002 - 09   |  | Rev 00  |                              |                             |   |   |   |       |       |   |       |       |   |      |      |   |       |       |  |       |       |   |      |      |
| WBS / ÁREA:   |       | AREA   |  | 4 DIGIT 8EO   |                              |                             |   |   |   |       |       |   |       |       |   |      |      |   |       |       |  |       |       |   |      |      |
| 3801  |       | REPORT NUMBER:<br>NÚMERO DE REPORTE:   |  | CI - 3801 - ITR - 09 - 1755   |                              |                             |   |   |   |       |       |   |       |       |   |      |      |   |       |       |  |       |       |   |      |      |
| LOCATION:<br>LOCALIZACIÓN:  |       | SOURCE:<br>PROCEDENCIA:  |  | Borrow 5  |                              |                             |   |   |   |       |       |   |       |       |   |      |      |   |       |       |  |       |       |   |      |      |
| ZONE-SAMPLE N°<br>ZONE-MUESTRA N°:  |       | COORDINATES:<br>COORDENADAS:   |  | N9584814.882 E774057.879 PROF. 30cm   |                              |                             |   |   |   |       |       |   |       |       |   |      |      |   |       |       |  |       |       |   |      |      |
| ZONA 1 - 3137   |       | N9584814.882 E774057.879   |  | PROF. 30cm  |                              |                             |   |   |   |       |       |   |       |       |   |      |      |   |       |       |  |       |       |   |      |      |
| ABBICISSA:<br>ABBICISA:   |       | SAMPLE DESCRIPTION<br>(VISUAL):  |  | Suelo arena limosa color marrón   |                              |                             |   |   |   |       |       |   |       |       |   |      |      |   |       |       |  |       |       |   |      |      |
| LEVEL:<br>COTA:   |       | DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA<br>(VISUAL):   |  | Suelo arena limosa color marrón   |                              |                             |   |   |   |       |       |   |       |       |   |      |      |   |       |       |  |       |       |   |      |      |
| 1461.478  |       | DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA<br>(VISUAL):   |  | Suelo arena limosa color marrón   |                              |                             |   |   |   |       |       |   |       |       |   |      |      |   |       |       |  |       |       |   |      |      |
| <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">RECIPIENT #<br/>RECIPIENTE #</th> <th style="width: 25%;">4</th> <th style="width: 25%;">3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>MC16<br/>MASA DE RECIPIENTE + MUESTRA HÚMEDA</td> <td>590.0</td> <td>607.0</td> </tr> <tr> <td>CONTAINER MASS + DRY SAMPLE ( P2 )<br/>MASA DE RECIPIENTE + MUESTRA SECA</td> <td>519.0</td> <td>534.0</td> </tr> <tr> <td>WATER MASS ( P3 = P1 - P2 )<br/>MASA DE AGUA</td> <td>71.0</td> <td>73.0</td> </tr> <tr> <td>CONTAINER MASS ( P4 )<br/>MASA DE RECIPIENTE</td> <td>286.0</td> <td>297.5</td> </tr> <tr> <td>DRY SAMPLE MASS ( P5 = P2 - P4 )<br/>MASA DE MUESTRA SECA</td> <td>233.0</td> <td>236.5</td> </tr> <tr> <td>HUMIDITY% ( W = P3 - 100 + P5 )<br/>% DE HUMEDAD</td> <td>30.5</td> <td>30.9</td> </tr> </tbody> </table> |       |  |  |   |                              | RECIPIENT #<br>RECIPIENTE # | 4 | 3 | MC16<br>MASA DE RECIPIENTE + MUESTRA HÚMEDA | 590.0 | 607.0 | CONTAINER MASS + DRY SAMPLE ( P2 )<br>MASA DE RECIPIENTE + MUESTRA SECA | 519.0 | 534.0 | WATER MASS ( P3 = P1 - P2 )<br>MASA DE AGUA | 71.0 | 73.0 | CONTAINER MASS ( P4 )<br>MASA DE RECIPIENTE | 286.0 | 297.5 | DRY SAMPLE MASS ( P5 = P2 - P4 )<br>MASA DE MUESTRA SECA | 233.0 | 236.5 | HUMIDITY% ( W = P3 - 100 + P5 )<br>% DE HUMEDAD | 30.5 | 30.9 |
| RECIPIENT #<br>RECIPIENTE #   | 4     | 3  |  |   |                              |                             |   |   |   |       |       |   |       |       |   |      |      |   |       |       |  |       |       |   |      |      |
| MC16<br>MASA DE RECIPIENTE + MUESTRA HÚMEDA   | 590.0 | 607.0  |  |   |                              |                             |   |   |   |       |       |   |       |       |   |      |      |   |       |       |  |       |       |   |      |      |
| CONTAINER MASS + DRY SAMPLE ( P2 )<br>MASA DE RECIPIENTE + MUESTRA SECA   | 519.0 | 534.0  |  |   |                              |                             |   |   |   |       |       |   |       |       |   |      |      |   |       |       |  |       |       |   |      |      |
| WATER MASS ( P3 = P1 - P2 )<br>MASA DE AGUA   | 71.0  | 73.0   |  |   |                              |                             |   |   |   |       |       |   |       |       |   |      |      |   |       |       |  |       |       |   |      |      |
| CONTAINER MASS ( P4 )<br>MASA DE RECIPIENTE   | 286.0 | 297.5  |  |   |                              |                             |   |   |   |       |       |   |       |       |   |      |      |   |       |       |  |       |       |   |      |      |
| DRY SAMPLE MASS ( P5 = P2 - P4 )<br>MASA DE MUESTRA SECA  | 233.0 | 236.5  |  |   |                              |                             |   |   |   |       |       |   |       |       |   |      |      |   |       |       |  |       |       |   |      |      |
| HUMIDITY% ( W = P3 - 100 + P5 )<br>% DE HUMEDAD   | 30.5  | 30.9   |  |   |                              |                             |   |   |   |       |       |   |       |       |   |      |      |   |       |       |  |       |       |   |      |      |
| AVERAGE HUMIDITY %<br>% de HUMEDAD PROMEDIO   |       |  |  | 30.7 %  |                              |                             |   |   |   |       |       |   |       |       |   |      |      |   |       |       |  |       |       |   |      |      |
| OBSERVATIONS:<br>OBSERVACIONES:   |       |  |  |   |                              |                             |   |   |   |       |       |   |       |       |   |      |      |   |       |       |  |       |       |   |      |      |
| Turno: Diurno<br>Muestra tomada en talud del Borrow 5 para calificación de material como Zona 1, previo a combinación con cemento para estudios solicitados por KCB   |       |  |  |   |                              |                             |   |   |   |       |       |   |       |       |   |      |      |   |       |       |  |       |       |   |      |      |
| LABORATORY TECHNICIAN<br>LABORATORISTA  |       |  | SAMPLING DATE<br>FECHA TOMA DE MUESTRA |   | TEST DATE<br>FECHA DE ENSAYO |                             |   |   |   |       |       |   |       |       |   |      |      |   |       |       |  |       |       |   |      |      |
| Carlos Lara   |       |  | 25-Dec-19                              |   | 25-Dec-19                    |                             |   |   |   |       |       |   |       |       |   |      |      |   |       |       |  |       |       |   |      |      |
| PRINT NAME<br>NOMBRE IMPRESO  |       | SIGNATURE<br>FIRMA   |  | DATE<br>FECHA   |                              |                             |   |   |   |       |       |   |       |       |   |      |      |   |       |       |  |       |       |   |      |      |
| LABORATORY LEADER<br>LÍDER DE LABORATORIO   |       | Osmar Romero R.  |  | <br>11-Jan-20 |                              |                             |   |   |   |       |       |   |       |       |   |      |      |   |       |       |  |       |       |   |      |      |

GRANULOMETRIC ANALYSIS OF SOILS BY SIZING ASTM D 8913  
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO ASTM D 8913

ITR - 082 - 18 Rev 00

| WBS / ÁREA:                             |  | REPORT NUMBER:<br>NÚMERO DE REPORTE:                               |  | AREA                            |  | 4 DEGIT 88Q |  |
|---|--|--|--|---------------------------------|--|-------------|--|
| 3801                                    |  | CI - 3801  |  | - ITR - 18 -                    |  | 0937        |  |
| LOCATION:<br>LOCALIZACIÓN:              |  | SOURCE<br>PROCEDENCIA:   |  | Borrow 5                        |  |             |  |
| TSF                                     |  |  |  |                                 |  |             |  |
| SAMPLE N° - ZONE:<br>MUESTRA N° - ZONE: |  | COORDINATES:<br>COORDENADAS:                                       |  | PROF.                           |  | 30 cm       |  |
| ZONA 1 - 3137                           |  | N9584814.882 E774057.879   |  |                                 |  |             |  |
| STATION:<br>ABSCISA:                    |  | SAMPLE DESCRIPTION (VSUAL):<br>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA (VISUAL): |  | Suelo limo arenoso color marrón |  |             |  |
| -                                       |  |  |  |                                 |  |             |  |
| LEVEL:<br>COTA:                         |  | 1451.478   |  |                                 |  |             |  |

| Natural Moisture Content Test<br>Corresponding to<br>Ensayo de Contenido de Humedad Natural<br>Correspondiente a |  | N° Bowl<br>Recipiente N°       |  | Test Mass<br>Humidity + Bowl<br>Masa de Muestra<br>Humedad +<br>Recipiente |  | Test Mass<br>Dry + Bowl<br>Masa de Muestra<br>Seca +<br>Recipiente |   | Water Mass<br>Masa de Agua |  | Recipient Mass<br>Masa del Recipiente  |  | Mass of Dry Test<br>Masa de Muestra<br>Seca |  | % Natural Moisture Content<br>% de Humedad Natural |  |
|--|--|--------------------------------|--|--|--|--|---|----------------------------|--|--|--|---|--|--|--|
| FINE SERIE<br>SERIE FINA   |  |                                |  |  |  |  |   |                            |  |  |  |   |  |  |  |
| N° SIEVE<br>TAMIZ N°   |  | RETAINED MASS<br>MASA RETENIDA |  | ACCUMULATED PERCENTAGE<br>PORCENTAJES ACUMULADOS                           |  |  | Specification (% Cumulative Passing)<br>Especificaciones (% Pasantes Acumulados Zona 1 TSF) |                            |  |  |  |   |  |  |  |
|  |  | Partial gr.<br>Parcial gr.     |  | Accumulated gr.<br>Acumulada gr.   |  | Retained<br>Retenido   |   | Passing<br>Pasante         |  | Corrected Passing<br>Pasante Corregido |  |   |  |  |  |
| 19. mm.  |  | 3/4 "                          |  |  |  |  |   |                            |  |  |  |   |  |  |  |
| 12.5 mm.   |  | 1/2 "                          |  |  |  |  |   |                            |  |  |  |   |  |  |  |
| 9.5 mm.  |  | 3/8 "                          |  |  |  |  |   |                            |  |  |  |   |  |  |  |
| 4.75 mm.   |  | No. 4                          |  | 0.0  |  | 0.0  |   | 100.0                      |  |  |  | 100   |  |  |  |
| 2. mm.   |  | No. 10                         |  | 1.00   |  | 1.00   |   | 99.7                       |  |  |  | 87  |  | 100  |  |
| 0.85 mm.   |  | No. 20                         |  | 9.00   |  | 10.00  |   | 96.7                       |  |  |  | 75  |  | 98   |  |
| 0.425 mm.  |  | No. 40                         |  | 40.00  |  | 50.00  |   | 83.3                       |  |  |  | 65  |  | 95   |  |
| 0.25 mm.   |  | No. 60                         |  | 40.00  |  | 90.00  |   | 70.0                       |  |  |  | 57  |  | 92   |  |
| 0.15 mm.   |  | No. 100                        |  | 25.00  |  | 115.00   |   | 61.7                       |  |  |  | 50  |  | 88   |  |
| 0.075 mm.  |  | No. 200                        |  | 19.00  |  | 134.00   |   | 55.3                       |  |  |  | 40  |  | 85   |  |

|  |                                 |   |                    |                    |                     |                     |                     |  |   |   |  |  |  |  |                                 |  |                        |      |        |
|--|---------------------------------|---|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--|---|---|--|--|--|--|---------------------------------|--|------------------------|------|--------|
| Dry mass fine part:<br>Masa Secca parte Fina:  |                                 | 300 g.  |                    | g.                 |                     |                     |                     |  |   |   |  |  |  |  |                                 |  |                        |      |        |
| <table border="1"> <tr> <td>Method<br/>Método de Ensayo</td> <td>Method<br/>Método A</td> <td>Method<br/>Método X</td> </tr> <tr> <td>Moisture<br/>Humedad</td> <td>Moisture<br/>Humedad</td> <td>Moisture<br/>Humedad</td> </tr> </table>                                   |                                 | Method<br>Método de Ensayo                                      | Method<br>Método A | Method<br>Método X | Moisture<br>Humedad | Moisture<br>Humedad | Moisture<br>Humedad | <p>ASTM SIEVES (Opening in millimeters)<br/>TAMICES ASTM (Aberturas en milímetros)</p> |   |   |  |  |  |  |                                 |  |                        |      |        |
| Method<br>Método de Ensayo   | Method<br>Método A              | Method<br>Método X  |                    |                    |                     |                     |                     |  |   |   |  |  |  |  |                                 |  |                        |      |        |
| Moisture<br>Humedad  | Moisture<br>Humedad             | Moisture<br>Humedad   |                    |                    |                     |                     |                     |  |   |   |  |  |  |  |                                 |  |                        |      |        |
| <table border="1"> <tr> <td colspan="2">State of material when tested<br/>Estado del material al ensayar</td> </tr> <tr> <td>Moist<br/>Húmedo</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Dry<br/>Seco al Aire</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Other<br/>Otro</td> <td>X</td> </tr> </table> |                                 | State of material when tested<br>Estado del material al ensayar |                    | Moist<br>Húmedo    |                     | Dry<br>Seco al Aire |                     | Other<br>Otro  | X | <table border="1"> <tr> <td>Specification - Characteristics of the material<br/>Especificación - Características del material</td> <td colspan="2">Zona 1 Pasante Tamiz No.200-80%</td> </tr> <tr> <td>% Pasante Tamiz No.200</td> <td>55.3</td> <td>CUMPLE</td> </tr> </table> |  |  |  | Specification - Characteristics of the material<br>Especificación - Características del material | Zona 1 Pasante Tamiz No.200-80% |  | % Pasante Tamiz No.200 | 55.3 | CUMPLE |
| State of material when tested<br>Estado del material al ensayar  |                                 |   |                    |                    |                     |                     |                     |  |   |   |  |  |  |  |                                 |  |                        |      |        |
| Moist<br>Húmedo  |                                 |   |                    |                    |                     |                     |                     |  |   |   |  |  |  |  |                                 |  |                        |      |        |
| Dry<br>Seco al Aire  |                                 |   |                    |                    |                     |                     |                     |  |   |   |  |  |  |  |                                 |  |                        |      |        |
| Other<br>Otro  | X                               |   |                    |                    |                     |                     |                     |  |   |   |  |  |  |  |                                 |  |                        |      |        |
| Specification - Characteristics of the material<br>Especificación - Características del material   | Zona 1 Pasante Tamiz No.200-80% |   |                    |                    |                     |                     |                     |  |   |   |  |  |  |  |                                 |  |                        |      |        |
| % Pasante Tamiz No.200   | 55.3                            | CUMPLE  |                    |                    |                     |                     |                     |  |   |   |  |  |  |  |                                 |  |                        |      |        |

OBSERVATIONS:  
OBSERVACIONES:

Turno: Diurno

Muestra tomada en Borrow 5 para calificación de material como Zona 1, previo a combinación con cemento para estudio solicitado por KCB.

| LABORATORY TECHNICIAN<br>LABORATORIO      |  | SAMPLE DATE<br>FECHA TOMA DE MUESTRA |  | TEST DATE<br>FECHA DE ENSAYO |  |
|---|--|--------------------------------------|--|------------------------------|--|
| Kenny Moreira                             |  | 26-Dec-19                            |  | 8-Jan-20                     |  |
| PRINT NAME<br>IMPRIMA EL NOMBRE           |  | SIGNATURE<br>FIRMA                   |  | DATE<br>FECHA                |  |
| LABORATORY LEADER<br>LIDER DE LABORATORIO |  | Osman Romero R.                      |  | 21-Jan-20                    |  |

LIMIT ASSESSMENT FOR LIQUID, PLASTIC AND PLASTICITY INDEX - ASTM D 4318  
DETERMINACIÓN DE LÍMITE LÍQUIDO, PLÁSTICO, E ÍNDICE DE PLASTICIDAD - ASTM D 4318

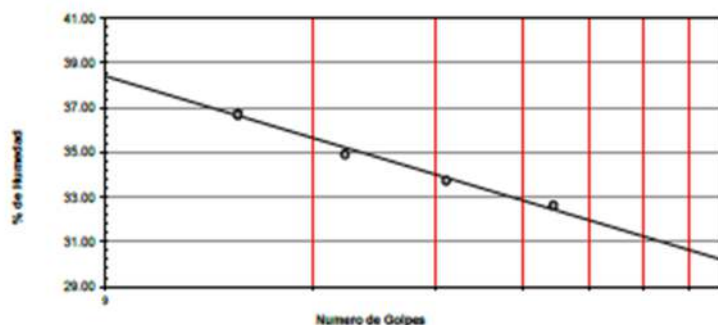
ITR -32 08 Rev 00

ÁREA 4 DIG 002

|  |                          |  |  |      |          |      |
|--|--------------------------|--|--|------|----------|------|
| WBS/ÁREA:  | 3801                     | REPORT NUMBER:<br>NÚMERO DE REPORTE      | Q-   | 3801 | -ITR-08- | 0986 |
| LOCATION:<br>LOCALIZACIÓN:   | TSF                      | SOURCE:<br>PROCEGENCIA:                  | Borrow 5   |      |          |      |
| SAMPLE TYPE:<br>TIPO DE MUESTRA:   | ZONA 1 - 3137            | ABSCISSA:<br>STATION:                    | -  |      |          |      |
| COORDINATES:<br>COORDENADAS:   | N9584814.882 E774057.879 | SAMPLE DESCRIPTION (MSUAL):              | Suelo limo arenoso color marrón  |      |          |      |
| PROCEDURE FOR PREPARING TEST SPECIMEN<br>PROCEDIMIENTO PARA PREPARACIÓN DE ESPECIMEN DE ENSAYO |                          | WET PREPARATION<br>PREPARACIÓN EN HÚMEDO | DRY PREPARATION<br>PREPARACIÓN EN SECO <input checked="" type="checkbox"/> |      |          |      |

| LIQUID LIMIT<br>LÍMITE LÍQUIDO   |       |       |       |       |  |
|--|-------|-------|-------|-------|--|
| CONTAINER #<br>RECIPIENTE #  | 59    | 22    | 60    | C4    |  |
| CONTAINER MASS + HUMIDITY SAMPLE (P1)<br>MASA DE RECIPIENTE + MUESTRA HÚMEDA | 23.56 | 24.38 | 22.29 | 23.16 |  |
| CYLINDER MASS + DRY SAMPLE (P2)<br>MASA DE RECIPIENTE + MUESTRA SECA         | 19.55 | 20.04 | 18.40 | 18.88 |  |
| WATER MASS (P3 + P1 - P2)<br>MASA DE AGUA                                    | 4.01  | 4.34  | 3.89  | 4.28  |  |
| CONTAINER MASS (P4)<br>MASA DE RECIPIENTE                                    | 7.26  | 7.18  | 7.26  | 7.22  |  |
| DRY SAMPLE MASS (P5 + P2 - P4)<br>MASA DE MUESTRA SECA                       | 12.29 | 12.86 | 11.14 | 11.66 |  |
| HUMIDITY % (W + P5 + 100 + P5)<br>% DE HUMEDAD                               | 32.63 | 33.75 | 34.92 | 36.71 |  |
| # OF STRIKES<br># DE GOLPES  | 40    | 28    | 20    | 14    |  |

| PLASTIC LIMIT<br>LÍMITE PLÁSTICO   |       |       |       |  | Observaciones:<br>Observations:   |
|--|-------|-------|-------|--|---|
| CONTAINER #<br>RECIPIENTE #  | 19    | 40    | 20    |  | Tumo: Diurno<br>Muestra tomada en Borrow 5 para calificación de material como Zona 1, previo a combinación con cemento para estudio solicitado por KCB. |
| CONTAINER MASS + HUMIDITY SAMPLE (P1)<br>MASA DE RECIPIENTE + MUESTRA HÚMEDA | 14.11 | 14.37 | 14.22 |  |   |
| CYLINDER MASS + DRY SAMPLE (P2)<br>MASA DE RECIPIENTE + MUESTRA SECA         | 12.70 | 12.91 | 12.81 |  |   |
| WATER MASS (P3 + P1 - P2)<br>MASA DE AGUA                                    | 1.41  | 1.46  | 1.41  |  |   |
| CONTAINER MASS (P4)<br>MASA DE RECIPIENTE                                    | 7.27  | 7.16  | 7.27  |  |   |
| DRY SAMPLE MASS (P5 + P2 - P4)<br>MASA DE MUESTRA SECA                       | 5.43  | 5.75  | 5.54  |  |   |
| HUMIDITY % (W + P5 + 100 + P5)<br>% DE HUMEDAD                               | 25.97 | 25.39 | 25.45 |  |   |



| RESULTADOS / RESULTS               |    |
|------------------------------------|----|
| L. Líquido =<br>L. Líquido         | 34 |
| L. Plástico =<br>L. Plástico       | 26 |
| L. Plasticidad =<br>L. Plasticidad | 9  |

Clasificación Según: Carta de Plasticidad  
ASTM D6487 SUCS = Símbolo  
de Grupo

**ML LIMO DE BAJA PLASTICIDAD COLOR MARRÓN**

|   |  |                           |
|---|--|---------------------------|
| LABORATORY TECHNICIAN<br>LABORATORISTA    | SAMPLING DATE<br>FECHA TOMA DE MUESTRA | TEST DATE<br>FECHA ENSAYO |
| Kenny Moreira                             | 25/12/2019                             | 10/01/2019                |
| LABORATORY LEADER<br>LÍDER DE LABORATORIO | PRINT NAME<br>NOMBRE IMPRESO           | SIGNATURE<br>FIRMA        |
|   | Osmer Romero R.                        |                           |
|   |  | DATE<br>FECHA             |
|   |  | 21/01/2020                |

SPECIFIC GRAVITY OF THE SOIL WITH THE USE OF THE PYCNOMETER ASTM D854  
GRAVEDAD ESPECIFICA DEL SUELO CON EL USO DEL PICNÓMETRO ASTM D854

ITR - 32 - 14

Rev 00

|   |                                      | AREA   |                                 | 4 DIGIT SEQ |                   |
|---|--------------------------------------|--|---------------------------------|-------------|-------------------|
| WBS / ÁREA:                                     | 3801                                 | REPORT NUMBER:<br>NÚMERO DE REPORTE:                                   | CI -                            | 3801        | - ITR - 14 - 0572 |
| LOCATION:<br>LOCALIZACIÓN:                      | TSF                                  | SOURCE:<br>PROCEDENCIA:  | Borrow 5                        |             |                   |
| ZONE-SAMPLE N°<br>ZONA-MUESTRA N°               | ZONA 1 - 3137                        | ABSCISSA:<br>ABSCISA:  | -                               | Prof :      | 30cm              |
| COORDINATES:<br>COORDENADAS:<br>LEVEL:<br>COTA: | N9584814.882 E774057.879<br>1461.478 | SAMPLE DESCRIPTION (VISUAL):<br>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA<br>(VISUAL): | Suelo Arena Limosa color marrón |             |                   |

TEST DATA  
DATOS DEL ENSAYO

| TEST N°<br>N° DE ENSAYO  |                |                    |        |             |
|--|----------------|--------------------|--------|-------------|
| PYCNOMETER CALIBRATED N°<br>N° DE PICNÓMETRO CALIBRADO                 |                |                    | 1      | 2           |
| PYCNOMETER MASS<br>MASA DEL PICNÓMETRO                                 | A              | gr.                | 59.42  | 60.63       |
| PYCNOMETER MASS + WATER<br>MASA DEL PICNÓMETRO + AGUA                  | B              | gr.                | 158.90 | 160.32      |
| TEMPERATURE<br>TEMPERATURA   | (T)            | °C                 | 23.00  | 23.00       |
| PYCNOMETER VOLUME V = B - A<br>VOLÚMEN DEL PICNÓMETRO V = B - A        | V              | cm <sup>3</sup>    | 99.48  | 99.69       |
| PYCNOMETER MASS + WATER + TEST<br>MASA DEL PICNÓMETRO + AGUA + MUESTRA | C              | gr.                | 189.60 | 191.14      |
| TEST MASS<br>MASA DE LA MUESTRA  | MA             | gr.                | 50.00  | 50.00       |
| TEMPERATURE CORRECTION FACTOR<br>FACTOR DE CORRECCIÓN POR TEMPERATURA  | K              |                    | 0.9997 | 0.9997      |
| SPECIFIC GRAVITY OF THE SOIL<br>GRAVEDAD ESPECIFICA DEL SUELO          | G <sub>s</sub> | gr/cm <sup>3</sup> | 2.59   | 2.61        |
|  |                |                    |        | <b>2.60</b> |

P  
R  
O  
M  
E  
D  
I  
O

FÓRMULA

$$G_s = \frac{MA}{B + MA - C} \times K$$

OBSERVATIONS  
OBSERVACIONES:

Turno: Diurno

Muestra tomada en Borrow 5 para calificación de material como Zona 1, previo a combinación con cemento para estudio solicitado por KCB

| LABORATORY TECHNICIAN<br>LABORATORISTA    | SAMPLE DATE<br>FECHA TOMA DE MUESTRA | TEST DATE<br>FECHA DE ENSAYO |
|---|--------------------------------------|------------------------------|
| Carlos Lara                               | 25/12/2019                           | 28/12/2019                   |
| PRINT NAME<br>IMPRIMA EL NOMBRE           | SIGNATURE<br>FIRMA                   | DATE<br>FECHA                |
| LABORATORY LEADER<br>LÍDER DE LABORATORIO | Osmar Romero R.                      | 11/01/2020                   |

| GRANULOMETRY USING A HYDROMETER (#200 THROUGH-HOLE SIEVE) - ASTM D 7928<br>GRANULOMETRÍA MEDIANTE EL USO DEL HIDRÓMETRO (PASANTE TAMIZ #200) - ASTM D 7928                    |   | ITR - 002 - 06  |   | Rev 01  |  |  |   |
|---|---|---|---|---|--|--|---|
|   |   | ÁREA  |   | 4 DIGIT 8EO   |  |  |   |
| WBS/AREA:   | 3801                                      | REPORT NUMBER<br>NÚMERO DE REPORTE  | CI -  | 3801  | - ITR - 06 -                                       | 0539   |   |
| LOCATION:<br>LOCALIZACIÓN:  | TSF                                       | SOURCE:<br>PROCEDENCIA:   | Borrow 5  |   |  |  |   |
| ZONE-SAMPLE N°<br>ZONA-MUESTRA N°   | ZONA 1 - 3137                             | COORDINATES:<br>COORDENADAS:  | N 9584814.882<br>E 774057.879                       | PROF.   | 30cm   |  |   |
| STATION:<br>ABSCISA:  | -   | SAMPLE DESCRIPTION (VISUAL):<br>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA (VISUAL):                                   | Suelo arena limosa color marrón                     |   |  |  |   |
| LEVEL:<br>NIVEL:  | 1451.48                                   |   |   |   |  |  |   |
| SAMPLE DATA<br>DATOS DE ENSAYO  |   |   |   |   |  |  |   |
| HYDROMETER TYPE:<br>HIDRÓMETRO TIPO:  | 151-H                                     | "Lecture de compensación del hidrómetro en la solución de referencia a la misma temperatura que $T_w$ | MENISCUS CORRECTION, Cmc<br>CORRECCIÓN POR MENISCO: | 1   |  |  |   |
| DRY SOIL MASS:<br>MASA DE SUELO SECO (Mg)   | 50.00                                     |   | % DISPERSANT<br>% DISPERSANTE                       | 5   |  |  |   |
| Gs:   | 2.60                                      | OIL SEDIMENTATION No:<br>CIL. SEDIMENTACIÓN No:   | 4   | #200 THROUGH-HOLE SIEVE %:<br>PASANTE TAMIZ #200 %:                             | 55.33  |  |   |
| HOUR<br>HORA  | ELAPSED TIME<br>TIEMPO TRANSCURRIDO (min) | HYDROMETER READING IN SUSPENSION<br>LECTURA HIDRÓMETRO EN SUSPENSIÓN $T_w$ (g/L)                      | TEMPERATURE<br>TEMPERATURA (°C)                     | HYDROMETER OFFSET READING<br>LECTURA DE COMPENSACIÓN DEL HIDRÓMETRO $T_w$ (g/L) | EFFECTIVE DEPTH<br>PROFUNDIDAD EFECTIVA $H_m$ (mm) | PARTICLE DIAMETER<br>DIÁMETRO DE LA PARTICULA $D_m$ (mm) | MASS PERCENT FINER<br>MASA MÁS FINA EN PORCENTAJE $N_m$ (%) |
| 10:00   | 1   | 1033  | 20.0  | 1005.5  | 7.58   | 0.038  | 88  |
|   | 2   | 1031  | 20.0  | 1005.5  | 8.14   | 0.028  | 82  |
|   | 4   | 1028  | 20.0  | 1005.5  | 8.97   | 0.021  | 72  |
|   | 8   | 1026  | 20.0  | 1005.5  | 9.53   | 0.015  | 66  |
|   | 15  | 1023  | 20.0  | 1005.5  | 10.36  | 0.012  | 56  |
|   | 30  | 1020  | 20.0  | 1005.5  | 11.19  | 0.008  | 47  |
|   | 60  | 1017  | 20.0  | 1005.5  | 12.03  | 0.006  | 37  |
|   | 120                                       | 1015  | 20.0  | 1005.5  | 12.58  | 0.004  | 31  |
|   | 240                                       | 1012  | 20.0  | 1005.5  | 13.42  | 0.003  | 21  |
|   | 480                                       | 1009  | 20.0  | 1005.5  | 14.25  | 0.002  | 11  |
|   | 1440                                      | 1007  | 20.0  | 1005.5  | 14.81  | 0.001  | 5   |
| OBSERVATIONS:<br>Turno: Diurno<br>Muestra tomada en Borrow 5 para calificación de material como Zona 1, previo a la combinación con cemento para estudios solicitados por KCB |   |   |   |   |  |  |   |
| LABORATORY TECHNICIAN<br>LABORATORISTA  |   |   |   | SAMPLING DATE<br>FECHA TOMA DE MUESTRA  |  | SAMPLING START DATE<br>FECHA DE INICIO DE ENSAYO         |   |
| Carlos Lara   |   |   |   | 25-Dec-19   |  | 2-Jan-20   |   |
| PRINT NAME<br>NOMBRE IMPRESO  |   |   |   | SIGNATURE<br>FIRMA  |  | DATE<br>FECHA  |   |
| LABORATORY LEADER<br>LÍDER DE LABORATORIO   |   |   |   | Osmer Romero R.   |  | 11-Jan-20  |   |

GRANULOMETRY USING A HYDROMETER (#200 THROUGH-HOLE SIEVE) - ASTM D 7928  
GRANULOMETRÍA MEDIANTE EL USO DEL HIDRÓMETRO (PASANTE TAMIZ #200) - ASTM D 7928

ITR - 032 - 06 Rev 00

PAG 2/3

AREA 4 DIGIT SEQ


|                                   |               |   |                                 |      |              |      |
|-----------------------------------|---------------|---|---------------------------------|------|--------------|------|
| WBS/AREA:                         | 3801          | REPORT NUMBER<br>NÚMERO DE REPORTE                                  | CI -                            | 3801 | - ITR - 06 - | 0539 |
| LOCATION:<br>LOCALIZACIÓN:        | TSF           | SOURCE:<br>PROCEDENCIA:   | Borrow 5                        |      |              |      |
| ZONE-SAMPLE N°<br>ZONA-MUESTRA N° | ZONA 1 - 3137 | COORDINATES:<br>CORDENADAS:   | N 9584814.882<br>E 774057.879   |      |              |      |
| STATION:<br>ABSCISA:              | -             | SAMPLE DESCRIPTION (VISUAL):<br>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA (VISUAL): | Suelo arena limosa color marrón |      |              |      |
| LEVEL:<br>NIVEL                   | 1461.48       |   |                                 |      |              |      |

ASTM D 6913 GRANULOMETRY (MATERIAL RETAINED IN #200 SIEVE)  
GRANULOMETRÍA ASTM D 6913 (MATERIAL RETENIDO EN TAMIZ # 200)

| SIEVE ASTM No<br>TAMIZ ASTM N° | OPENING<br>ABERTURA (mm) | PARTIAL MASS RETAINED<br>MASA RETENIDA PARCIAL | ACCUMULATED MASS<br>RETAINED<br>MASA RETENIDA<br>ACUMULADA | PERCENTAGE<br>RETAINED (%)<br>PORCENTAJE<br>RETENIDO (%) | PERCENTAGE<br>PASSED (%)<br>PORCENTAJE<br>QUE PASA (%) | PERCENTAGE PASSED<br>CORRECTED<br>PORCENTAJE QUE PASA<br>CORREGIDO |
|--------------------------------|--------------------------|--|--|--|--|--|
| #4                             | 4.75                     | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 100.00   | 100.0  |
| #10                            | 2.00                     | 1.00   | 1.00   | 0.33   | 99.67  | 99.7   |
| #20                            | 0.85                     | 9.00   | 10.00  | 3.33   | 96.67  | 96.7   |
| #40                            | 0.420                    | 40.00  | 50.00  | 16.67  | 83.33  | 83.3   |
| #60                            | 0.250                    | 40.00  | 90.00  | 30.00  | 70.00  | 70.0   |
| #100                           | 0.150                    | 25.00  | 115.00   | 38.33  | 61.67  | 61.7   |
| #200                           | 0.074                    | 19.00  | 134.00   | 44.67  | 55.33  | 55.3   |
| DRY MASS<br>MASA SECA (g)      |                          |  | 300.00   |  |  |  |

ASTM D 7928 GRANULOMETRY USING A HYDROMETER (MATERIAL RETAINED IN #200 SIEVE)  
GRANULOMETRÍA ASTM D 7928 MEDIANTE EL USO DEL HIDRÓMETRO (PASANTE TAMIZ #200)

|  |        |  |  |  |        |        |
|--|--------|--|--|--|--------|--------|
|  | 0.0381 |  |  |  | 88.328 | 48.875 |
|  | 0.0279 |  |  |  | 81.905 | 45.321 |
|  | 0.0207 |  |  |  | 72.270 | 39.989 |
|  | 0.0151 |  |  |  | 65.846 | 36.435 |
|  | 0.0115 |  |  |  | 58.211 | 31.104 |
|  | 0.0085 |  |  |  | 46.576 | 25.772 |
|  | 0.0062 |  |  |  | 38.941 | 20.441 |
|  | 0.0045 |  |  |  | 30.518 | 16.887 |
|  | 0.0033 |  |  |  | 20.883 | 11.555 |
|  | 0.0024 |  |  |  | 11.248 | 6.224  |
|  | 0.0014 |  |  |  | 4.824  | 2.689  |

|  |                                 |   |  |
|--|---------------------------------|---|--|
|  | PRINT NAME<br>IMPRIMA EL NOMBRE | SIGNATURE<br>FIRMA  | SAMPLING DATE<br>FECHA TOMA DE MUESTRA |
| LABORATORY LEADER<br>JEFE DE LABORATORIO | Osmar Romero R.                 |  | 25-Dec-19                              |

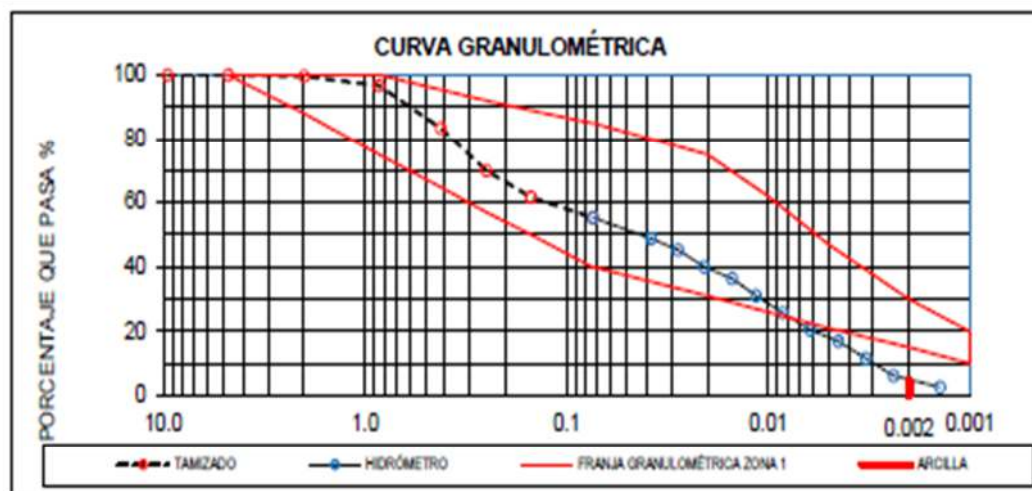
GRANULOMETRY USING A HYDROMETER (#200 THROUGH-HOLE SIEVE) - ASTM D 7928  
GRANULOMETRÍA MEDIANTE EL USO DEL HIDRÓMETRO (PASANTE TAMIZ #200) - ASTM D 7928

ITR - 032 -06 Rev 00

PAG 3/3

ÁREA 4 DIGIT SEQ

|                                   |               |  |                                 |      |              |      |
|-----------------------------------|---------------|--|---------------------------------|------|--------------|------|
| WBS/ÁREA:                         | 3801          | REPORT NUMBER<br>NÚMERO DE REPORTE     | CI-                             | 3801 | - ITR - 06 - | 0539 |
| LOCATION:<br>LOCALIZACIÓN:        | TSF           | SOURCE:<br>PROCEDENCIA:                | Borrow 5                        |      |              |      |
| ZONE-SAMPLE N°<br>ZONA-MUESTRA N° | ZONA 1 - 3137 | COORDINATES:<br>COORDENADAS:           | N 9584814.882<br>E 774057.879   |      |              |      |
| STATION:<br>ABSCISA:              | -             | SAMPLE DESCRIPTION<br>(VISUAL):        | Suelo arena limosa color marrón |      |              |      |
| LEVEL:<br>NIVEL                   | 1461.48       | DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA<br>(VISUAL): |                                 |      |              |      |



|               |                  |
|---------------|------------------|
| %SAND - ARENA | % FINES - FINOS  |
| 44.67         | 55.33            |
| % SILT - LIMO | % CLAY - ARCILLA |
| 50.50         | 4.83             |

|   |  |                              |
|---|--|------------------------------|
| LABORATORY TECHNICIAN<br>LABORATORISTA    | SAMPLING DATE<br>FECHA TOMA DE MUESTRA | TEST DATE<br>FECHA DE ENSAYO |
| Carlos Lara                               | 25-Dec-19                              | 2-Jan-20                     |
| LABORATORY LEADER<br>LÍDER DE LABORATORIO | PRINT NAME<br>IMPRIMA EL NOMBRE        | SIGNATURE<br>FIRMA           |
|   | Osmar Romero R.                        |                              |
|   |  | DATE<br>FECHA                |
|   |  | 11-Jan-20                    |

| AURELIAN<br>ECUADOR S.A.  |                               |                            |   | FRUTA DEL NORTE PROJECT<br>QUALITY DOCUMENTATION<br>PROYECTO FRUTA DEL NORTE<br>DOCUMENTACIÓN DE CALIDAD |                               |                                       |   |  |                               |                  |                                  |
|---|-------------------------------|----------------------------|---|--|-------------------------------|---------------------------------------|---|--|-------------------------------|------------------|----------------------------------|
| DETERMINING DISPERSIVE CHARACTERISTICS OF SOILS BY THE CRUMB TEST ASTM D 893-13<br>DETERMINACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE SUELOS MÉTODO DE LA MIGA ASTM D 893-13 |                               |                            |   | ITR - 002 - 48   |                               | Rev 00                                |   |  |                               |                  |                                  |
| WBS / AREA: 3801  |                               |                            |   | REPORT NUMBER:<br>NUMERO DE REPORTE: CI - 3801 - ITR - 48  |                               | 4 DIGIT SEQ: 0007                     |   |  |                               |                  |                                  |
| LOCATION:<br>LOCALIZACIÓN: TSF  |                               |                            |   | SOURCE:<br>PROCEDENCIA: Borrow 5   |                               |                                       |   |  |                               |                  |                                  |
| SAMPLE N° - ZONE:<br>MUESTRA N° - ZONE: ZONA 1- 3137  |                               |                            |   | COORDINATES:<br>COORDENADAS: N: 9584814,882 E: 774057,879  |                               | PROF.: 30cm                           |   |  |                               |                  |                                  |
| STATION:<br>ABSCISA: -  |                               |                            |   | SAMPLE DESCRIPTION (VISUAL):<br>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA (VISUAL): Limo arenoso color marrón            |                               |                                       |   |  |                               |                  |                                  |
| LEVEL:<br>COTA: 1451,478  |                               |                            |   |  |                               |                                       |   |  |                               |                  |                                  |
| Natural Moisture Content Test<br>Corresponding to<br>Ensayo de Contenido de Humedad<br>Natural  |                               | N° Bowl<br>Recipiente N.º  | Test Mass<br>Humidity + Bowl<br>Masa de Muestra<br>Húmeda + | Test Mass<br>Dry + Bowl<br>Masa de Muestra<br>Seca +   | Water Mass<br>Masa de Agua    | Recipient Mass<br>Masa del Recipiente | Mass of Dry<br>Test<br>Masa de<br>Muestra | % Natural Moisture<br>Content<br>% de<br>Humedad<br>Natural                |                               |                  |                                  |
| FINE SIEVE<br>SEIUE FINA  |                               | LG-2                       | 100,64  | 84,4   | 16,24                         | 31,72                                 | 52,68                                     | 30,8   |                               |                  |                                  |
| FINE SIEVE<br>SEIUE FINA  |                               | LG-32                      | 123,38  | 102,33   | 21,05                         | 31,86                                 | 70,47                                     | 29,9   |                               |                  |                                  |
| Specimen Identification -<br>Identificación de Especimen:   |                               | 240                        |   | Specimen Identification -<br>Identificación de Especimen:  |                               | 240                                   |   | Specimen Identification -<br>Identificación de Especimen:                  |                               |                  |                                  |
| Container Identification -<br>Identificación de Recipiente:   |                               | 1                          |   | Container Identification -<br>Identificación de Recipiente:  |                               | 2                                     |   | Container Identification -<br>Identificación de Recipiente:                |                               |                  |                                  |
| Method -<br>Método:   | A (Natural) - (Natural)       |                            | Method -<br>Método:   | A (Natural) - (Natural)  |                               | Method -<br>Método:                   | A (Natural) - (Natural)                   |  |                               |                  |                                  |
|   | X                             | B (Remolded) - (Remoldado) |   | X  | B (Remolded) - (Remoldado)    |                                       | X   | B (Remolded) - (Remoldado)   |                               |                  |                                  |
| Water Type -<br>Tipo  | X Deslited - Destilada        |                            | Water Type -<br>Agua Tipo                                   | X Deslited - Destilada   |                               | Water Type -<br>Agua Tipo             | Deslited - Destilada                      |  |                               |                  |                                  |
|   | Type IV - Tipo IV             |                            |   | Type IV - Tipo IV  |                               |                                       | Type IV - Tipo IV                         |  |                               |                  |                                  |
| Initial Water Temperature °C -<br>Temperatura Inicial del Agua °C:  |                               | 20                         |   | Initial Water Temperature °C -<br>Temperatura Inicial del Agua °C:                                       |                               | 20                                    |   | Initial Water Temperature °C -<br>Temperatura Inicial del Agua °C:         |                               |                  |                                  |
| Start Time (hh:mm:ss) -<br>Hora de Inicio (hh:mm:ss):   |                               | 12:18                      |   | Start Time (hh:mm:ss) -<br>Hora de Inicio (hh:mm:ss):  |                               | 12:20                                 |   | Start Time (hh:mm:ss) -<br>Hora de Inicio (hh:mm:ss):                      |                               |                  |                                  |
| Target Reading<br>Tiempo Transcurrido:  | Time Taken<br>Hora de Lectura | Grade -<br>Grado           | Temperature °C<br>Temperatura °C                            | Target Reading<br>Tiempo Transcurrido:   | Time Taken<br>Hora de Lectura | Grade -<br>Grado                      | Temperature °C<br>Temperatura °C          | Target Reading<br>Tiempo Transcurrido:                                     | Time Taken<br>Hora de Lectura | Grade -<br>Grado | Temperature °C<br>Temperatura °C |
| 2 m ± 15 s  | 12:20                         | 1                          | 20  | 2 m ± 15 s   | 12:22                         | 1                                     | 20  | 2 m ± 15 s   |                               |                  |                                  |
| 1 h ± 8 m   | 18:20                         | 1                          | 20  | 1 h ± 8 m  | 18:26                         | 1                                     | 20  | 1 h ± 8 m  |                               |                  |                                  |
| 6 h ± 45 m  | 18:20                         | 1                          | 20  | 6 h ± 45 m   | 18:30                         | 1                                     | 20  | 6 h ± 45 m   |                               |                  |                                  |
| Dispersive Classification -<br>Classification Dispersiva  |                               | Grado 1 no dispersivo      |   | Dispersive Classification -<br>Classification Dispersiva   |                               | Grado 1 no dispersivo                 |   | Dispersive Classification -<br>Classification Dispersiva                   |                               |                  |                                  |
| Additional Water Added to remold (method B)<br>Adicione agua para remoldar  |                               |                            |   | Additional Water Added to remold (method B)<br>Adicione agua para remoldar                               |                               |                                       |   | Additional Water Added to remold (method B)<br>Adicione agua para remoldar |                               |                  |                                  |
| SI <input type="checkbox"/> NO <input checked="" type="checkbox"/>  |                               |                            |   | SI <input type="checkbox"/> NO <input checked="" type="checkbox"/>                                       |                               |                                       |   | SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/>                    |                               |                  |                                  |
| Remark -<br>Observaciones:  |                               |                            |   |  |                               |                                       |   |  |                               |                  |                                  |
| Turno: Diurno<br>Muestra tomada del borrow 5 para calificación como material zona 1, previo a combinación con cemento para estudios solicitados por KCB.    |                               |                            |   |  |                               |                                       |   |  |                               |                  |                                  |
| LABORATORY TECHNICIAN<br>LABORATORISTA  |                               |                            |   |  |                               | SAMPLE DATE<br>FECHA DE MUESTREO      |   |  | TEST DATE<br>FECHA DE ENSAYO  |                  |                                  |
| Cecilia Lara  |                               |                            |   |  |                               | 18/02/2020                            |   |  | 18/02/2020                    |                  |                                  |
| PRINT NAME<br>IMPRIMA EL NOMBRE   |                               |                            |   |  |                               | SIGNATURE<br>FIRMA                    |   |  | DATE<br>FECHA                 |                  |                                  |
| LABORATORY LEADER<br>LIDER DE LABORATORIO   |                               |                            |   |  |                               | Rolando Gómez                         |   |  | 18/02/2020                    |                  |                                  |

DETERMINING DISPERSIVE CHARACTERISTICS OF SOILS BY THE CRUMB TEST ASTM D 857-13  
DETERMINACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE SUELOS MÉTODO DE LA MIGA ASTM D 857-13

ITR - 002 - 48

Rev 00

|   |  |              |   |                |               |            |      |
|---|--|--------------|---|----------------|---------------|------------|------|
| WBS / ÁREA:                             |  | 3801         | REPORT NUMBER:<br>NÚMERO DE REPORTE:                                | CI -           | 3801          | - ITR - 48 | 0007 |
| LOCATION:<br>LOCALIZACIÓN:              |  | TSF          | SOURCE:<br>PROCEDECENCIA:   | Borrow 5       |               |            |      |
| SAMPLE N° - ZONE:<br>MUESTRA N° - ZONE: |  | ZONA 1- 3137 | COORDINATES:<br>COORDENADAS:  | N: 9584814,882 | E: 774057,879 | PROF.      | 30cm |
| STATION:<br>ABSCISA:                    |  | -            | SAMPLE DESCRIPTION (VISUAL):<br>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA (VISUAL): |                |               |            |      |
| LEVEL:<br>COTA:                         |  | 1451,478     | Limo arenoso color mamón  |                |               |            |      |

**ENSAYO N° 1**

2 min



1 hora



6 horas



**ENSAYO N° 2**

2 min



1 hora



6 horas



LABORATORY TECHNICIAN  
LABORATORISTA

SAMPLE DATE  
FECHA DE MUESTREO

TEST DATE  
FECHA DE ENSAYO

Carlos Lara

18/02/2020

18/02/2020

PRINT NAME  
IMPRIMA EL NOMBRE

SIGNATURE  
FIRMA

DATE  
FECHA


LABORATORY LEADER  
LIDER DE LABORATORIO

Rolando Gómez

*Rolando Gómez*

18/02/2020

Caracterización Zona 1 (M 3138)

|    |                                      | FRUTA DEL NORTE PROJECT QUALITY DOCUMENTATION<br>PROYECTO FRUTA DEL NORTE DOCUMENTACIÓN DE CALIDAD |  |               |                              |                             |   |   |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |        |        |  |        |
|---|--------------------------------------|--|--|---------------|------------------------------|-----------------------------|---|---|---|--------|--------|---|--------|--------|---|-------|-------|---|--------|--------|--|--------|
| DETERMINATION OF THE HUMIDITY CONTENT - ASTM D 2216<br>DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD - ASTM D 2216   |                                      | ITR - 002 - 09   |  | Rev 00        |                              |                             |   |   |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |        |        |  |        |
| WBS / AREA:   |                                      | AREA   |  | 4 DIGIT SEQ   |                              |                             |   |   |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |        |        |  |        |
| 3801  | REPORT NUMBER:<br>NÚMERO DE REPORTE: | CI -   | 3801                                   | - ITR - 09 -  | 1757                         |                             |   |   |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |        |        |  |        |
| LOCATION:<br>LOCALIZACIÓN:  | T5F                                  | SOURCE:<br>PROCEDENCIA:  | Borrow 2                               |               |                              |                             |   |   |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |        |        |  |        |
| ZONE-SAMPLE N°<br>ZONE-MUESTRA N°:  | ZONA 1 - 3138                        | COORDINATES:<br>COORDENADAS:   | N9584612.383 E773646.495               | PROF.         | 30cm                         |                             |   |   |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |        |        |  |        |
| ABSCISSA:<br>ABSCISA:   | -                                    | SAMPLE DESCRIPTION<br>(VISUAL):<br>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA<br>(VISUAL):                          | Suelo arenoso café rojizo              |               |                              |                             |   |   |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |        |        |  |        |
| LEVEL:<br>COTA:   | 1455.539                             |  |  |               |                              |                             |   |   |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |        |        |  |        |
| <table border="1"> <tr> <td>RECIPIENT #<br/>RECIPIENTE #</td> <td>3</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>MC16<br/>MASA DE RECIPIENTE + MUESTRA HÚMEDA</td> <td>438.02</td> <td>462.01</td> </tr> <tr> <td>CONTAINER MASS + DRY SAMPLE ( P2 )<br/>MASA DE RECIPIENTE + MUESTRA SECA</td> <td>402.74</td> <td>420.38</td> </tr> <tr> <td>WATER MASS ( P3 = P1 - P2 )<br/>MASA DE AGUA</td> <td>35.28</td> <td>41.63</td> </tr> <tr> <td>CONTAINER MASS ( P4 )<br/>MASA DE RECIPIENTE</td> <td>296.45</td> <td>295.29</td> </tr> <tr> <td>DRY SAMPLE MASS ( P6 = P2 - P4 )<br/>MASA DE MUESTRA SECA</td> <td>106.29</td> <td>125.09</td> </tr> <tr> <td>HUMIDITY% ( W = P3 + 100 + P6 )<br/>% DE HUMEDAD</td> <td>33.19</td> <td>33.28</td> </tr> </table> |                                      |  |  |               |                              | RECIPIENT #<br>RECIPIENTE # | 3 | 8 | MC16<br>MASA DE RECIPIENTE + MUESTRA HÚMEDA | 438.02 | 462.01 | CONTAINER MASS + DRY SAMPLE ( P2 )<br>MASA DE RECIPIENTE + MUESTRA SECA | 402.74 | 420.38 | WATER MASS ( P3 = P1 - P2 )<br>MASA DE AGUA | 35.28 | 41.63 | CONTAINER MASS ( P4 )<br>MASA DE RECIPIENTE | 296.45 | 295.29 | DRY SAMPLE MASS ( P6 = P2 - P4 )<br>MASA DE MUESTRA SECA | 106.29 |
| RECIPIENT #<br>RECIPIENTE #   | 3                                    | 8  |  |               |                              |                             |   |   |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |        |        |  |        |
| MC16<br>MASA DE RECIPIENTE + MUESTRA HÚMEDA   | 438.02                               | 462.01   |  |               |                              |                             |   |   |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |        |        |  |        |
| CONTAINER MASS + DRY SAMPLE ( P2 )<br>MASA DE RECIPIENTE + MUESTRA SECA   | 402.74                               | 420.38   |  |               |                              |                             |   |   |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |        |        |  |        |
| WATER MASS ( P3 = P1 - P2 )<br>MASA DE AGUA   | 35.28                                | 41.63  |  |               |                              |                             |   |   |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |        |        |  |        |
| CONTAINER MASS ( P4 )<br>MASA DE RECIPIENTE   | 296.45                               | 295.29   |  |               |                              |                             |   |   |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |        |        |  |        |
| DRY SAMPLE MASS ( P6 = P2 - P4 )<br>MASA DE MUESTRA SECA  | 106.29                               | 125.09   |  |               |                              |                             |   |   |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |        |        |  |        |
| HUMIDITY% ( W = P3 + 100 + P6 )<br>% DE HUMEDAD   | 33.19                                | 33.28  |  |               |                              |                             |   |   |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |        |        |  |        |
| AVERAGE HUMIDITY %<br>% de HUMEDAD PROMEDIO   |                                      |  | 33.24 %                                |               |                              |                             |   |   |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |        |        |  |        |
| OBSERVATIONS:<br>OBSERVACIONES:   |                                      |  |  |               |                              |                             |   |   |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |        |        |  |        |
| Turno: Diurno<br>Muestra tomada en talud del Borrow 2 para calificación de material como Zona 1, previo a combinación con cemento para estudios solicitados por KCB. (Esta humedad se obtuvo mediante secado al aire libre. Con esta humedad se realizó las pruebas suelo-cemento).   |                                      |  |  |               |                              |                             |   |   |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |        |        |  |        |
| LABORATORY TECHNICIAN<br>LABORATORISTA  |                                      |  | SAMPLING DATE<br>FECHA TOMA DE MUESTRA |               | TEST DATE<br>FECHA DE ENSAYO |                             |   |   |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |        |        |  |        |
| Carlos Lara   |                                      |  | 21-Jan-20                              |               | 25-Jan-20                    |                             |   |   |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |        |        |  |        |
| PRINT NAME<br>NOMBRE IMPRESO  |                                      | SIGNATURE<br>FIRMA   |  | DATE<br>FECHA |                              |                             |   |   |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |        |        |  |        |
| LABORATORY LEADER<br>LÍDER DE LABORATORIO   |                                      | Cristian Orozco  |  | 25-Jan-20     |                              |                             |   |   |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |        |        |  |        |

GRANULOMETRIC ANALYSIS OF SOILS BY SIZING ASTM D 6913  
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO ASTM D 6913

ITR - 082 - 18 Rev 00

AVBA 4 DIGIT 3820

|   |               |   |                          |       |              |     |
|---|---------------|---|--------------------------|-------|--------------|-----|
| WBS / AREA:                             | 3801          | REPORT NUMBER:<br>NÚMERO DE REPORTE:                                | CI -                     | 3801  | - ITR - 18 - | 939 |
| LOCATION:<br>LOCALIZACIÓN:              | TSF           | SOURCE:<br>PROCEIDENCIA:  | Borrow 2                 |       |              |     |
| SAMPLE N° - ZONE:<br>MUESTRA N° - ZONE: | ZONA 1 - 3138 | COORDINATES:<br>COORDENADAS:  | N9584512.383 E773646.495 | PROF. | 30 cm        |     |
| STATION:<br>ABSCISA:                    | -             | SAMPLE DESCRIPTION (VISUAL):<br>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA (VISUAL): | Limo arenoso café rojizo |       |              |     |
| LEVEL:<br>COTA:                         | 1465.539      |   |                          |       |              |     |

| Natural Moisture Content Test<br>Corresponding to<br>Ensayo de Contenido de Humedad Natural<br>Correspondiente a | N° Bowl<br>Recipiente N° | Test Mass<br>Humidity + Bowl<br>Masa de Muestra<br>Humedad +<br>Recipiente | Test Mass<br>Dry + Bowl<br>Masa de Muestra<br>Seca +<br>Recipiente | Water Mass<br>Masa de Agua | Recipient Mass<br>Masa del Recipiente | Mass of Dry Test<br>Masa de Muestra<br>Seca | % Natural Moisture Content<br>% de Humedad<br>Natural |
|--|--------------------------|--|--|----------------------------|---------------------------------------|---|---|
| FINE SERIE<br>SERIE FINA   |                          |  |  |                            |                                       |   |   |

| N° SIEVE<br>TAMIZ N° | RETAINED MASS<br>MASA RETENIDA |                                 | ACCUMULATED PERCENTAGE<br>PORCENTAJES ACUMULADOS |                    |  | Specification (% Cumulative Passing)<br>Especificaciones (% Pasantes Acumulados Zona 1 TSF) |       |
|----------------------|--------------------------------|---------------------------------|--|--------------------|--|---|-------|
|                      | Partial gr.<br>Parcial g.      | Accumulated gr.<br>Acumulada g. | Retained<br>Retenido                             | Passing<br>Pasante | Corrected Passing<br>Pasante Corregido |   |       |
| 19. mm.              | 3/4 "                          |                                 |  |                    |  |   |       |
| 12.5 mm.             | 1/2 "                          |                                 |  |                    |  |   |       |
| 9.5 mm.              | 3/8 "                          |                                 |  |                    |  |   |       |
| 4.75 mm.             | No. 4                          | 0.0                             | 0.00   | 0.0                | 100.0                                  |   | 100   |
| 2. mm.               | No. 10                         | 2.00                            | 2.00   | 0.7                | 99.3                                   | 87  | - 100 |
| 0.85 mm.             | No. 20                         | 14.00                           | 16.00  | 5.3                | 94.7                                   | 75  | - 98  |
| 0.425 mm.            | No. 40                         | 35.00                           | 51.00  | 17.0               | 83.0                                   | 65  | - 95  |
| 0.25 mm.             | No. 60                         | 35.00                           | 86.00  | 28.6               | 71.4                                   | 57  | - 92  |
| 0.15 mm.             | No. 100                        | 28.00                           | 114.00   | 38.0               | 62.0                                   | 50  | - 88  |
| 0.075 mm.            | No. 200                        | 26.00                           | 140.00   | 45.6               | 53.4                                   | 40  | - 85  |

Dry mass fine part: 300.21 gr.  
Masa Seca parte Fina: gr.

|  |                                     |                                 |                                     |
|--|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| Method<br>Método de Ensayo   | Method<br>Método A                  | Method<br>Método B              | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Moisture<br>Humedad  | Moisture<br>Humedad                 | Moisture<br>Humedad             | <input checked="" type="checkbox"/> |
| State of material when tested<br>Estado del material al ensayar                                  |                                     |                                 |                                     |
| Moist<br>Humedo  | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/>            |
| W/Dry<br>Seco al Frio  | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/>            |
| Dry<br>Seco al Sol   | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/>            |
| Specification - Characteristics of the material<br>Especificación - Características del material |                                     | Zone 1 Pasante Tamiz No.200-40% |                                     |
| % Pasante Tamiz No.200   | 53.4                                | CUMPLE                          |                                     |



OBSERVATIONS:

OBSERVACIONES:

Turno: Diurno

Muestra tomada en Borrow 5 para calificación de material como Zona 1, previo a combinación con cemento para estudio solicitado por KCB.

|   |                                      |                              |
|---|--------------------------------------|------------------------------|
| LABORATORY TECHNICIAN<br>LABORATORIO      | SAMPLE DATE<br>FECHA TOMA DE MUESTRA | TEST DATE<br>FECHA DE ENSAYO |
| Carlos Lara                               | 21-Jan-20                            | 24-Jan-20                    |
| PRINT NAME<br>IMPRIMA EL NOMBRE           | SIGNATURE<br>FIRMA                   | DATE<br>FECHA                |
| LABORATORY LEADER<br>LÍDER DE LABORATORIO | Cristian Orozco                      | 25-Jan-20                    |

LIMIT ASSESSMENT FOR LIQUID, PLASTIC AND PLASTICITY INDEX - ASTM D 4318  
DETERMINACIÓN DE LÍMITE LÍQUIDO, PLÁSTICO, E ÍNDICE DE PLASTICIDAD - ASTM D 4318

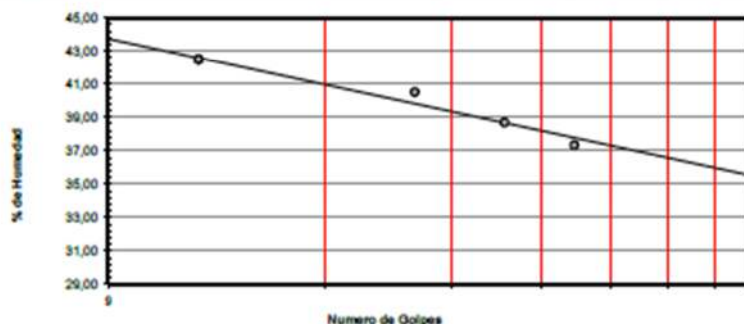
ITR -32 08 Rev 00

ÁREA 4 DIO SEQ

|  |  |  |  |      |          |      |
|--|--|--|--|------|----------|------|
| WBS/ÁREA:  | 3801                                       | REPORT NUMBER:<br>NÚMERO DE REPORTE      | CI-  | 3801 | -ITR-08- | 0987 |
| LOCATION:<br>LOCALIZACIÓN:   | TSF  | SOURCE:<br>PROCEDENCIA:                  | Borrow 2   |      |          |      |
| SAMPLE TYPE:<br>TIPO DE MUESTRA:   | ZONA 1 - 3138                              | ADDRESS:<br>STATION:                     | -  |      |          |      |
| COORDINATES:<br>COORDENADAS:   | N 9584612,383 ; E 773646,495<br>C 1465,539 | SAMPLE DESCRIPTION (USUAL):              | Suelo limo arenoso color café rojizo                                       |      |          |      |
| PROCEDURE FOR PREPARING TEST SPECIMEN<br>PROCEDIMIENTO PARA PREPARACIÓN DE ESPÉCIMEN DE ENSAYO |  | WET PREPARATION<br>PREPARACIÓN EN HÚMEDO | DRY PREPARATION<br>PREPARACIÓN EN SECO <input checked="" type="checkbox"/> |      |          |      |

| LIQUID LIMIT<br>LÍMITE LÍQUIDO   |       |       |       |       |  |
|--|-------|-------|-------|-------|--|
| CONTAINER #<br>RECIPIENTE #  | 0     | 9     | 12    | 19    |  |
| CONTAINER MASS + HUMIDITY SAMPLE (P1)<br>MASA DE RECIPIENTE + MUESTRA HÚMEDA | 20,44 | 21,45 | 20,46 | 21,52 |  |
| CYLINDER MASS + DRY SAMPLE (P2)<br>MASA DE RECIPIENTE + MUESTRA SECA         | 16,63 | 17,48 | 16,64 | 17,27 |  |
| WATER MASS (P3 = P1 - P2)<br>MASA DE AGUA                                    | 3,61  | 3,97  | 3,82  | 4,25  |  |
| CONTAINER MASS (P4)<br>MASA DE RECIPIENTE                                    | 7,16  | 7,22  | 7,21  | 7,27  |  |
| DRY SAMPLE MASS (P5 = P2 - P4)<br>MASA DE MUESTRA SECA                       | 9,67  | 10,26 | 9,43  | 10,00 |  |
| HUMIDITY % (W = P3 * 100 / P5)<br>% DE HUMEDAD                               | 37,33 | 38,69 | 40,51 | 42,50 |  |
| # OF STRIKES<br># DE GOLPES  | 40    | 32    | 24    | 12    |  |

| PLASTIC LIMIT<br>LÍMITE PLÁSTICO   |       |       |       |  | Observaciones:<br>Observations:<br><br>Muestra tomada en Borrow 2 para ensayos de de compresion simple, suelo - emento para estudio solicitado por KCB. |
|--|-------|-------|-------|--|---|
| CONTAINER #<br>RECIPIENTE #  | 12    | 59    | 22    |  |   |
| CONTAINER MASS + HUMIDITY SAMPLE (P1)<br>MASA DE RECIPIENTE + MUESTRA HÚMEDA | 16,05 | 16,57 | 16,12 |  |   |
| CYLINDER MASS + DRY SAMPLE (P2)<br>MASA DE RECIPIENTE + MUESTRA SECA         | 13,98 | 14,36 | 14,04 |  |   |
| WATER MASS (P3 = P1 - P2)<br>MASA DE AGUA                                    | 2,07  | 2,21  | 2,08  |  |   |
| CONTAINER MASS (P4)<br>MASA DE RECIPIENTE                                    | 7,18  | 7,24  | 7,16  |  |   |
| DRY SAMPLE MASS (P5 = P2 - P4)<br>MASA DE MUESTRA SECA                       | 6,80  | 7,12  | 6,88  |  |   |
| HUMIDITY % (W = P3 * 100 / P5)<br>% DE HUMEDAD                               | 30,44 | 31,04 | 30,23 |  |   |



| RESULTADOS / RESULTS              |    |
|-----------------------------------|----|
| L. Liquid =<br>L. Líquido         | 40 |
| L. Plastic =<br>L. Plástico       | 31 |
| L. Plasticity =<br>L. Plasticidad | 9  |

Clasificación Según Carta de Plasticidad  
ASTM D2487 SUCS = Símbolo  
de Grupo

**MIL LIMO DE BAJA PLASTICIDAD COLOR CAFÉ ROJIZO**

|   |  |                           |
|---|--|---------------------------|
| LABORATORY TECHNICIAN<br>LABORATORISTA    | SAMPLING DATE<br>FECHA TOMA DE MUESTRA | TEST DATE<br>FECHA ENSAYO |
| Carlos Lara                               | 21/1/2019                              | 24/1/2019                 |
| LABORATORY LEADER<br>LÍDER DE LABORATORIO | PRINT NAME<br>NOMBRE IMPRESO           | SIGNATURE<br>FIRMA        |
|   | Cristian Orozco                        |                           |
|   |  | DATE<br>FECHA             |
|   |  | 25/1/2019                 |

SPECIFIC GRAVITY OF THE SOIL WITH THE USE OF THE PYCNOMETER ASTM D854 ITR - 32 - 14 Rev 00  
GRAVEDAD ESPECIFICA DEL SUELO CON EL USO DEL PICNÓMETRO ASTM D854

|   |  | AREA   |                          | 4 DIGIT SEQ  |      |
|---|--|--|--------------------------|--------------|------|
| WBS / ÁREA:                                     | 3801                                     | REPORT NUMBER:<br>NÚMERO DE REPORTE:                                   | CI - 3801                | - ITR - 14 - | 0573 |
| LOCATION:<br>LOCALIZACIÓN:                      | TSF                                      | SOURCE:<br>PROCEDENCIA:  | Borrow 2                 |              |      |
| ZONE-SAMPLE N°<br>ZONA-MUESTRA N°               | ZONA 1 - 3138                            | ABSCISSA:<br>ABSCISA:  | -                        | Prof:        | 30cm |
| COORDINATES:<br>COORDENADAS:<br>LEVEL:<br>COTA: | N: 9584612.383 E: 773646.495<br>1465.539 | SAMPLE DESCRIPTION (VISUAL):<br>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA<br>(VISUAL): | Limo arenoso café rojizo |              |      |

TEST DATA  
DATOS DEL ENSAYO

| TEST N°<br>N° DE ENSAYO  |                |        |        |        |
|--|----------------|--------|--------|--------|
| PYCNOMETER CALIBRATED N°<br>N° DE PICNÓMETRO CALIBRADO                 |                |        | 1      | 2      |
| PYCNOMETER MASS<br>MASA DEL PICNÓMETRO                                 | A              | gr.    | 62.90  | 61.14  |
| PYCNOMETER MASS + WATER<br>MASA DEL PICNÓMETRO + AGUA                  | B              | gr.    | 172.06 | 173.30 |
| TEMPERATURE<br>TEMPERATURA   | (T)            | °C     | 21.50  | 21.50  |
| PYCNOMETER VOLUME V = B - A<br>VOLÚMEN DEL PICNÓMETRO V = B - A        | V              | cm3    | 109.16 | 112.16 |
| PYCNOMETER MASS + WATER + TEST<br>MASA DEL PICNÓMETRO + AGUA + MUESTRA | C              | gr.    | 203.33 | 204.58 |
| TEST MASS<br>MASA DE LA MUESTRA  | MA             | gr.    | 50.00  | 50.00  |
| TEMPERATURE CORRECTION FACTOR<br>FACTOR DE CORRECCIÓN POR TEMPERATURA  | K              |        | 0.9997 | 0.9997 |
| SPECIFIC GRAVITY OF THE SOIL<br>GRAVEDAD ESPECIFICA DEL SUELO          | G <sub>s</sub> | gr/cm3 | 2.67   | 2.67   |

P  
R  
O  
M  
E  
D  
I  
O

2.67

FÓRMULA

$$G_s = \frac{MA}{B + MA - C} \times K$$

OBSERVATIONS  
OBSERVACIONES:

Turno: Diurno

Muestra tomada en Borrow 5 para calificación de material como Zona 1, previo a combinación con cemento para estudio solicitado por KCB

| LABORATORY TECHNICIAN<br>LABORATORISTA | SAMPLE DATE<br>FECHA TOMA DE MUESTRA | TEST DATE<br>FECHA DE ENSAYO |
|--|--------------------------------------|------------------------------|
| Carlos Lara                            | 21/01/2020                           | 24/01/2020                   |

|   | PRINT NAME<br>IMPRIMA EL NOMBRE | SIGNATURE<br>FIRMA   | DATE<br>FECHA |
|---|---------------------------------|--|---------------|
| LABORATORY LEADER<br>LÍDER DE LABORATORIO | Cristian Orozco                 |  | 25/01/2020    |

| GRANULOMETRY USING A HYDROMETER (#200 THROUGH-HOLE SIEVE) - ASTM D 7928<br>GRANULOMETRÍA MEDIANTE EL USO DEL HIDRÓMETRO (PASANTE TAMIZ #200) - ASTM D 7928                    |   | ITR - 002 - 06  |   | Rev 01   |  |  |  |
|---|---|---|---|--|--|--|--|
|   |   | ÁREA  |   | 4 DIGIT BCD  |  |  |  |
| WBS/AREA:   | 3801  | REPORT NUMBER<br>NÚMERO DE REPORTE  | CI -  | 3801   | - ITR - 06 - 0541                                  |  |  |
| LOCATION:<br>LOCALIZACIÓN:  | TSF   | SOURCE:<br>PROCEDECIA:  | Borrow 2  |  |  |  |  |
| ZONE-SAMPLE N°<br>ZONA-MUESTRA N°   | ZONA 1 - 3138                                   | COORDINATES:<br>COORDENADAS:  | N 9584612,383<br>E 773646,495                       | PROF.  | 30cm   |  |  |
| STATION:<br>ABSCISA:  | .   | SAMPLE DESCRIPTION (VSUAL):<br>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA (VSUAL):                                     | Suelo limo arenoso color café rojizo                |  |  |  |  |
| LEVEL:<br>NIVEL:  | 1465.54   |   |   |  |  |  |  |
| SAMPLE DATA<br>DATOS DE ENSAYO  |   |   |   |  |  |  |  |
| HYDROMETER TYPE:<br>HIDRÓMETRO TIPO:  | 151-H   | "Lecture de compensación del hidrómetro en la solución de referencia a la misma temperatura que $t_w$ | MENISCUS CORRECTION, Cmc<br>CORRECCIÓN POR MENISCO: | 1  |  |  |  |
| DRY SOIL MASS:<br>MASA DE SUELO SECO (Mg)   | 50.00   |   | % DISPERSANT<br>% DISPERSANTE                       | 5  |  |  |  |
| Gr:   | 2.67  | CIL SEDIMENTATION No:<br>CIL SEDIMENTACIÓN No:  | 4   | #200 THROUGH-HOLE SIEVE %<br>PASANTE TAMIZ #200 %:                                       | 53.37  |  |  |
| HOUR<br>HORA  | ELAPSED TIME<br>TIEMPO<br>TRANSCURRIDO<br>(min) | HYDROMETER READING IN<br>SUSPENSION<br>LECTURA HIDRÓMETRO EN<br>SUSPENSIÓN<br>$t_w$ (g/L)             | TEMPERATURE<br>TEMPERATURA<br>(°C)                  | HYDROMETER OFFSET READING<br>LECTURA DE COMPENSACIÓN<br>DEL HIDRÓMETRO **<br>$t_w$ (g/L) | EFFECTIVE DEPTH<br>PROFUNDIDAD EFECTIVA<br>Hm (cm) | PARTICLE<br>DIAMETER<br>DÍAMETRO DE LA<br>PARTÍCULA<br>Dm (mm) | MASS PERCENT FINER<br>MASA MÁS FINA EN<br>PORCENTAJE<br>Nm (%) |
| 10:00   | 1   | 1030  | 20.0  | 1005.5   | 8.41   | 0.039  | 77   |
|   | 2   | 1029  | 20.0  | 1005.5   | 8.69   | 0.028  | 74   |
|   | 4   | 1028  | 20.0  | 1005.5   | 8.97   | 0.020  | 71   |
|   | 8   | 1026  | 20.0  | 1005.5   | 9.53   | 0.015  | 65   |
|   | 15  | 1024  | 20.0  | 1005.5   | 10.08  | 0.011  | 58   |
|   | 30  | 1021  | 20.0  | 1005.5   | 10.91  | 0.008  | 49   |
|   | 60  | 1020  | 20.0  | 1005.5   | 11.19  | 0.006  | 46   |
|   | 120   | 1016  | 20.0  | 1005.5   | 12.30  | 0.004  | 33   |
|   | 240   | 1014  | 20.0  | 1005.5   | 12.86  | 0.003  | 27   |
|   | 480   | 1012  | 20.0  | 1005.5   | 13.42  | 0.002  | 21   |
|   | 1440  | 1010  | 20.0  | 1005.5   | 13.97  | 0.001  | 14   |
| OBSERVATIONS:<br>Turno: Diurno<br>Muestra tomada en Borrow 2 para calificación de material como Zona 1, previo a la combinación con cemento para estudios solicitados por KCB |   |   |   |  |  |  |  |
| LABORATORY TECHNICIAN<br>LABORATORISTA  |   |   |   | SAMPLING DATE<br>FECHA TOMA DE MUESTRA   |  | SAMPLING START DATE<br>FECHA DE INICIO DE ENSAYO               |  |
| Carlos Lara   |   |   |   | 25-Dec-19  |  | 2-Jan-20   |  |
| LABORATORY LEADER<br>LÍDER DE LABORATORIO   |   |   |   | PRINT NAME<br>NOMBRE IMPRESO   |  | SIGNATURE<br>FIRMA   |  |
|   |   |   |   | Osmer Romero R.  |  | DATE<br>FECHA  |  |
|   |   |   |   |  |  | 11-Jan-20  |  |

GRANULOMETRY USING A HYDROMETER ( #200 THROUGH-HOLE SIEVE) - ASTM D 7928 ITR - 032 -06 Rev 00  
GRANULOMETRÍA MEDIANTE EL USO DEL HIDRÓMETRO (PASANTE TAMIZ #200) - ASTM D 7928

PAG 2/3

ÁREA 4 DIGIT SEQ


|                                   |               |   |                                      |      |              |      |
|-----------------------------------|---------------|---|--------------------------------------|------|--------------|------|
| WBS/AREA:                         | 3801          | REPORT NUMBER<br>NÚMERO DE REPORTE                                  | CI -                                 | 3801 | - ITR - 06 - | 0541 |
| LOCATION:<br>LOCALIZACIÓN:        | TSF           | SOURCE:<br>PROCEDENCIA:   | Borrow 2                             |      |              |      |
| ZONE-SAMPLE N°<br>ZONA-MUESTRA N° | ZONA 1 - 3138 | COORDINATES:<br>CORDENADAS:   | N 9584612,383<br>E 773646,495        |      |              |      |
| STATION:<br>ABSCISA:              | -             | SAMPLE DESCRIPTION (VISUAL):<br>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA (VISUAL): | Suelo limo arenoso color café rojizo |      |              |      |
| LEVEL:<br>NIVEL                   | 1465.54       |   |                                      |      |              |      |

ASTM D 6913 GRANULOMETRY (MATERIAL RETAINED IN #200 SIEVE)  
GRANULOMETRÍA ASTM D 6913 (MATERIAL RETENIDO EN TAMIZ # 200)

| SIEVE ASTM No<br>TAMIZ ASTM N° | OPENING<br>ABERTURA (mm) | PARTIAL MASS RETAINED<br>MASA RETENIDA PARCIAL | ACCUMULATED MASS<br>RETAINED<br>MASA RETENIDA<br>ACUMULADA | PERCENTAGE<br>RETAINED (%)<br>PORCENTAJE<br>RETENIDO (%) | PERCENTAGE<br>PASSED (%)<br>PORCENTAJE<br>QUE PASA (%) | PERCENTAGE PASSED<br>CORRECTED<br>PORCENTAJE QUE PASA<br>CORREGIDO |
|--------------------------------|--------------------------|--|--|--|--|--|
| #4                             | 4.75                     | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 100.00   | 100.0  |
| #10                            | 2.00                     | 2.00   | 2.00   | 0.67   | 99.33  | 99.3   |
| #20                            | 0.85                     | 14.00  | 16.00  | 5.33   | 94.67  | 94.7   |
| #40                            | 0.420                    | 35.00  | 51.00  | 16.99  | 83.01  | 83.0   |
| #60                            | 0.250                    | 35.00  | 86.00  | 28.65  | 71.35  | 71.4   |
| #100                           | 0.150                    | 28.00  | 114.00   | 37.97  | 62.03  | 62.0   |
| #200                           | 0.074                    | 26.00  | 140.00   | 46.63  | 53.37  | 53.4   |
| DRY MASS<br>MASA SECA (gr)     |                          |  | 300.21   |  |  |  |

ASTM D 7928 GRANULOMETRY USING A HYDROMETER (MATERIAL RETAINED IN #200 SIEVE)  
GRANULOMETRÍA ASTM D 7928 MEDIANTE EL USO DEL HIDRÓMETRO (PASANTE TAMIZ #200)

|            |        |  |  |  |        |        |
|------------|--------|--|--|--|--------|--------|
|            | 0.0303 |  |  |  | 77.424 | 41.318 |
|            | 0.0282 |  |  |  | 74.265 | 39.632 |
|            | 0.0203 |  |  |  | 71.105 | 37.946 |
| OBSERVATIO | 0.0148 |  |  |  | 64.785 | 34.573 |
|            | 0.0111 |  |  |  | 58.465 | 31.200 |
|            | 0.0082 |  |  |  | 48.985 | 26.141 |
|            | 0.0059 |  |  |  | 45.825 | 24.455 |
|            | 0.0043 |  |  |  | 33.186 | 17.710 |
|            | 0.0031 |  |  |  | 28.866 | 14.337 |
|            | 0.0023 |  |  |  | 20.546 | 10.965 |
|            | 0.0013 |  |  |  | 14.226 | 7.592  |

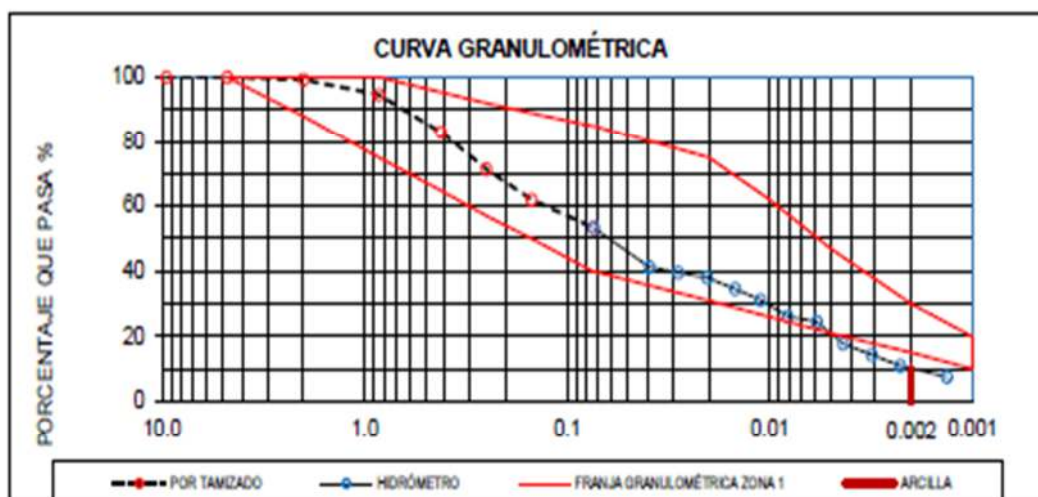
|   |                                 |   |  |
|---|---------------------------------|---|--|
|   | PRINT NAME<br>IMPRIMA EL NOMBRE | SIGNATURE<br>FIRMA  | SAMPLING DATE<br>FECHA TOMA DE MUESTRA |
| LABORATORY LEADER<br>LÍDER DE LABORATORIO | Osmar Romero R.                 |  | 25-Dec-19                              |

GRANULOMETRY USING A HYDROMETER (#200 THROUGH-HOLE SIEVE) - ASTM D 7928  
GRANULOMETRÍA MEDIANTE EL USO DEL HIDRÓMETRO (PASANTE TAMIZ #200) - ASTM D 7928

ITR - 032 - 06 Rev 00

PAG 3/3

|                                   |  |               |  |                                      |      |              |       |
|-----------------------------------|--|---------------|--|--------------------------------------|------|--------------|-------|
| WBS/ÁREA:                         |  | 3801          | REPORT NUMBER<br>NÚMERO DE REPORTE     | CI -                                 | 3801 | - ITR - 06 - | 00541 |
| LOCATION:<br>LOCALIZACIÓN:        |  | TSF           | SOURCE:<br>PROCEDECENCIA:              | Borrow 2                             |      |              |       |
| ZONE-SAMPLE N°<br>ZONA-MUESTRA N° |  | ZONA 1 - 3138 | COORDINATES:<br>CORDENADAS:            | N 9584612,383<br>E 773646,495        |      |              |       |
| STATION:<br>ABSCISA:              |  | -             | SAMPLE DESCRIPTION<br>(VISUAL):        | Suelo limo arenoso color café rojizo |      |              |       |
| LEVEL:<br>NIVEL                   |  | 1465.54       | DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA<br>(VISUAL): |                                      |      |              |       |



|               |                  |
|---------------|------------------|
| %SAND - ARENA | % FINES - FINOS  |
| 46.63         | 53.37            |
| % SILT - LIMO | % CLAY - ARCILLA |
| 43.36         | 10.01            |

|   |  |                              |
|---|--|------------------------------|
| LABORATORY TECHNICIAN<br>LABORATORISTA    | SAMPLING DATE<br>FECHA TOMA DE MUESTRA | TEST DATE<br>FECHA DE ENSAYO |
| Carlos Lara                               | 25-Dec-19                              | 2-Jan-20                     |
| LABORATORY LEADER<br>LÍDER DE LABORATORIO | PRINT NAME<br>IMPRIMA EL NOMBRE        | SIGNATURE<br>FIRMA           |
|   | Osmar Romero R.                        |                              |
|   |  | DATE<br>FECHA                |
|   |  | 11-Jan-20                    |

| Natural Moisture Content Test<br>Corresponding to<br>Ensayo de Contenido de Humedad<br>Natural   |                               | N <sup>o</sup> Bowl<br>Recipiente N <sup>o</sup>                   | Test Mass<br>Humidity + Bowl<br>Masa de Muestra<br>Húmeda + | Test Mass<br>Dry + Bowl<br>Masa de Muestra<br>Seca +                       | Water Mass<br>Masa de Agua    | Recipient Mass<br>Masa del Recipiente                              | Mass of Dry<br>Test<br>Masa de<br>Muestra | % Natural Moisture<br>Content<br>% de<br>Humedad<br>Natural                |                               |   |                                  |
|--|-------------------------------|--|---|--|-------------------------------|--|---|--|-------------------------------|---|----------------------------------|
| FINE SIEVE<br>SEIE FINA  |                               | LG-7   | 101,39  | 81,96  | 19,43                         | 30,49  | 51,47                                     | 37,8   |                               |   |                                  |
| FINE SIEVE<br>SEIE FINA  |                               | LG-10  | 107,38  | 86,58  | 20,8                          | 31,52  | 55,06                                     | 37,8   |                               |   |                                  |
| Specimen Identification -<br>Identificación de Especimen:  |                               | 239  |   | Specimen Identification -<br>Identificación de Especimen:                  |                               | 239  |   | Specimen Identification -<br>Identificación de Especimen:                  |                               |   |                                  |
| Container Identification -<br>Identificación de Recipiente:  |                               | 1  |   | Container Identification -<br>Identificación de Recipiente:                |                               | 2  |   | Container Identification -<br>Identificación de Recipiente:                |                               |   |                                  |
| Method -<br>Método:  | A (Natural) - (Natural)       |  | Method -<br>Método:   | A (Natural) - (Natural)  |                               | Method -<br>Método:  | A (Natural) - (Natural)                   |  |                               |   |                                  |
|  | X                             | B (Remolded) - (Remolded)  |   | X  | B (Remolded) - (Remolded)     |  | X   | B (Remolded) - (Remolded)  |                               |   |                                  |
| Water Type -<br>Tipo   | X Distilled - Destilada       |  | Water Type -<br>Agua Tipo                                   | X Distilled - Destilada  |                               | Water Type -<br>Agua Tipo  | Distilled - Destilada                     |  |                               |   |                                  |
|  | Type IV - Tipo IV             |  |   | Type IV - Tipo IV  |                               |  | Type IV - Tipo IV                         |  |                               |   |                                  |
| Initial Water Temperature °C -<br>Temperatura Inicial del Agua °C:   |                               | 20   |   | Initial Water Temperature °C -<br>Temperatura Inicial del Agua °C:         |                               | 20   |   | Initial Water Temperature °C -<br>Temperatura Inicial del Agua °C:         |                               |   |                                  |
| Start Time (hh:mm:ss) -<br>Hora de Inicio (hh:mm:ss):  |                               | 12:16  |   | Start Time (hh:mm:ss) -<br>Hora de Inicio (hh:mm:ss):                      |                               | 12:18  |   | Start Time (hh:mm:ss) -<br>Hora de Inicio (hh:mm:ss):                      |                               |   |                                  |
| Target Reading<br>Tiempo Transcurrido  | Time Taken<br>Hora de Lectura | Grade -<br>Grado   | Temperature °C<br>Temperatura °C                            | Target Reading<br>Tiempo Transcurrido                                      | Time Taken<br>Hora de Lectura | Grade -<br>Grado   | Temperature °C<br>Temperatura °C          | Target Reading<br>Tiempo Transcurrido                                      | Time Taken<br>Hora de Lectura | Grade -<br>Grado  | Temperature °C<br>Temperatura °C |
| 2 m ± 15 s   | 12:17                         | 1  | 20  | 2 m ± 15 s   | 12:20                         | 1  | 20  | 2 m ± 15 s   |                               |   |                                  |
| 1 h ± 8 m  | 18:17                         | 1  | 20  | 1 h ± 8 m  | 18:20                         | 1  | 20  | 1 h ± 8 m  |                               |   |                                  |
| 6 h ± 45 m   | 18:17                         | 1  | 20  | 6 h ± 45 m   | 18:20                         | 1  | 20  | 6 h ± 45 m   |                               |   |                                  |
| Dispersive Classification -<br>Clasificación Dispersiva  |                               | Grado 1 no dispersivo  |   | Dispersive Classification -<br>Clasificación Dispersiva                    |                               | Grado 1 no dispersivo  |   | Dispersive Classification -<br>Clasificación Dispersiva                    |                               |   |                                  |
| Additional Water Added to remold (method B)<br>Adicione agua para remoldar   |                               | SI <input type="checkbox"/> NO <input checked="" type="checkbox"/> |   | Additional Water Added to remold (method B)<br>Adicione agua para remoldar |                               | SI <input type="checkbox"/> NO <input checked="" type="checkbox"/> |   | Additional Water Added to remold (method B)<br>Adicione agua para remoldar |                               | SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> |                                  |
| Remark -<br>Observaciones:   |                               |  |   |  |                               |  |   |  |                               |   |                                  |
| Turno: Diurno<br>Muestra tomada del borrow 2 para calificación como material zona 1, previo a combinación con cemento para estudios solicitados por KCB. (Esta humedad se obtuvo mediante secado al aire libre, con esta humedad se realizó las pruebas de suelo-cemento). |                               |  |   |  |                               |  |   |  |                               |   |                                  |
| LABORATORY TECHNICIAN<br>LABORATORISTA   |                               |  |   | SAMPLE DATE<br>FECHA DE MUESTREO   |                               |  |   | TEST DATE<br>FECHA DE ENSAYO   |                               |   |                                  |
| Carlos Lara  |                               |  |   | 18/02/20   |                               |  |   | 18/02/20   |                               |   |                                  |
| PRINT NAME<br>IMPRIMA EL NOMBRE  |                               |  |   | SIGNATURE<br>FIRMA   |                               |  |   | DATE<br>FECHA  |                               |   |                                  |
| LABORATORY LEADER<br>LÍDER DE LABORATORIO  |                               |  |   | Rolando Gómez  |                               |  |   | 18/02/20   |                               |   |                                  |

DETERMINING DISPERSIVE CHARACTERISTICS OF SOILS BY THE CRUMB TEST ASTM D 8573-13  
DETERMINACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE SUELOS MÉTODO DE LA MGA ASTM D 8573-13

ITR - 002 - 46

Rev 00

| WBS / ÁREA:                             |  | 3801         | REPORT NUMBER:<br>NÚMERO DE REPORTE:                                | CI -                         | 3801 | - ITR - 46 | 0008 |
|---|--|--------------|---|------------------------------|------|------------|------|
| LOCATION:<br>LOCALIZACIÓN:              |  | TSF          | SOURCE:<br>PROCEDENCIA:   | Borrow 2                     |      |            |      |
| SAMPLE N° - ZONE:<br>MUESTRA N° - ZONE: |  | ZONA 1- 3138 | COORDINATES:<br>COORDENADAS:  | N: 9584612,383 E: 773646,495 |      | PROF.      | 30cm |
| STATION:<br>ESTACION:                   |  | -            | SAMPLE DESCRIPTION (VISUAL):<br>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA (VISUAL): |                              |      |            |      |
| LEVEL:<br>COTA:                         |  | 1645,530     |   |                              |      |            |      |
| Limo arenoso café rojizo                |  |              |   |                              |      |            |      |

**ENSAYO N° 1**

2 min

1 hora

6 horas



**ENSAYO N° 2**

2 min



1 hora

6 horas



|   |               |                                  |                              |
|---|---------------|----------------------------------|------------------------------|
| LABORATORY TECHNICIAN<br>LABORATORISTA    |               | SAMPLE DATE<br>FECHA DE MUESTREO | TEST DATE<br>FECHA DE ENSAYO |
| Carlos Lara                               |               | 18/02/2020                       | 18/02/2020                   |
| PRINT NAME<br>IMPRIMA EL NOMBRE           |               | SIGNATURE<br>FIRMA               | DATE<br>FECHA                |
| LABORATORY LEADER<br>LIDER DE LABORATORIO | Rolando Gómez |                                  | 19/02/2020                   |

Caracterización Zona 1 (M 3139)

|   |                              | FRUTA DEL NORTE PROJECT QUALITY DOCUMENTATION<br>PROYECTO FRUTA DEL NORTE DOCUMENTACIÓN DE CALIDAD |                                  |            |        |                             |      |       |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |       |       |  |        |        |   |       |       |
|--|------------------------------|--|----------------------------------|------------|--------|-----------------------------|------|-------|---|--------|--------|---|--------|--------|---|-------|-------|---|-------|-------|--|--------|--------|---|-------|-------|
| DETERMINATION OF THE HUMIDITY CONTENT - ASTM D 2216<br>DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD - ASTM D 2216  |                              | ITR - 002 - 09   |                                  | Rev 00     |        |                             |      |       |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |       |       |  |        |        |   |       |       |
|  |                              | AREA   |                                  | 4 DKIT 8EQ |        |                             |      |       |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |       |       |  |        |        |   |       |       |
| WBS / AREA:  | 3801                         | REPORT NUMBER:<br>NÚMERO DE REPORTE:   | CI - 3801 - ITR - 09 - 1758      |            |        |                             |      |       |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |       |       |  |        |        |   |       |       |
| LOCATION:<br>LOCALIZACIÓN:   | TSF                          | SOURCE:<br>PROCEDENCIA:  | Borrow 4                         |            |        |                             |      |       |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |       |       |  |        |        |   |       |       |
| ZONE-SAMPLE N°<br>ZONE-MUESTRA N°:   | ZONA 1 - 3139                | COORDINATES:<br>COORDENADAS:   | N 9584808.133 /E 773696.912      | PROF.      | 0.30 m |                             |      |       |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |       |       |  |        |        |   |       |       |
| ABSCISSA:<br>ABSICISA:   | -                            | SAMPLE DESCRIPTION<br>(VISUAL):<br>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA<br>(VISUAL):                          | Arcilla arenosa color cafe claro |            |        |                             |      |       |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |       |       |  |        |        |   |       |       |
| LEVEL:<br>COTA:  | 1452.783                     |  |                                  |            |        |                             |      |       |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |       |       |  |        |        |   |       |       |
| <table border="1"> <thead> <tr> <th>RECIPIENT #<br/>RECIPIENTE #</th> <th>MC 2</th> <th>MC 18</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>MC16<br/>MASA DE RECIPIENTE - MUESTRA HÚMEDA</td> <td>213.45</td> <td>213.30</td> </tr> <tr> <td>CONTAINER MASS • DRY SAMPLE ( P2 )<br/>MASA DE RECIPIENTE - MUESTRA SECA</td> <td>169.18</td> <td>168.99</td> </tr> <tr> <td>WATER MASS ( P3 = P1 - P2 )<br/>MASA DE AGUA</td> <td>44.27</td> <td>44.31</td> </tr> <tr> <td>CONTAINER MASS ( P4 )<br/>MASA DE RECIPIENTE</td> <td>52.06</td> <td>51.53</td> </tr> <tr> <td>DRY SAMPLE MASS ( P6 = P2 - P4 )<br/>MASA DE MUESTRA SECA</td> <td>117.12</td> <td>117.46</td> </tr> <tr> <td>HUMIDITY% ( W = P3 • 100 • P6 )<br/>% DE HUMEDAD</td> <td>37.80</td> <td>37.72</td> </tr> </tbody> </table> |                              |  |                                  |            |        | RECIPIENT #<br>RECIPIENTE # | MC 2 | MC 18 | MC16<br>MASA DE RECIPIENTE - MUESTRA HÚMEDA | 213.45 | 213.30 | CONTAINER MASS • DRY SAMPLE ( P2 )<br>MASA DE RECIPIENTE - MUESTRA SECA | 169.18 | 168.99 | WATER MASS ( P3 = P1 - P2 )<br>MASA DE AGUA | 44.27 | 44.31 | CONTAINER MASS ( P4 )<br>MASA DE RECIPIENTE | 52.06 | 51.53 | DRY SAMPLE MASS ( P6 = P2 - P4 )<br>MASA DE MUESTRA SECA | 117.12 | 117.46 | HUMIDITY% ( W = P3 • 100 • P6 )<br>% DE HUMEDAD | 37.80 | 37.72 |
| RECIPIENT #<br>RECIPIENTE #  | MC 2                         | MC 18  |                                  |            |        |                             |      |       |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |       |       |  |        |        |   |       |       |
| MC16<br>MASA DE RECIPIENTE - MUESTRA HÚMEDA  | 213.45                       | 213.30   |                                  |            |        |                             |      |       |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |       |       |  |        |        |   |       |       |
| CONTAINER MASS • DRY SAMPLE ( P2 )<br>MASA DE RECIPIENTE - MUESTRA SECA  | 169.18                       | 168.99   |                                  |            |        |                             |      |       |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |       |       |  |        |        |   |       |       |
| WATER MASS ( P3 = P1 - P2 )<br>MASA DE AGUA  | 44.27                        | 44.31  |                                  |            |        |                             |      |       |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |       |       |  |        |        |   |       |       |
| CONTAINER MASS ( P4 )<br>MASA DE RECIPIENTE  | 52.06                        | 51.53  |                                  |            |        |                             |      |       |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |       |       |  |        |        |   |       |       |
| DRY SAMPLE MASS ( P6 = P2 - P4 )<br>MASA DE MUESTRA SECA   | 117.12                       | 117.46   |                                  |            |        |                             |      |       |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |       |       |  |        |        |   |       |       |
| HUMIDITY% ( W = P3 • 100 • P6 )<br>% DE HUMEDAD  | 37.80                        | 37.72  |                                  |            |        |                             |      |       |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |       |       |  |        |        |   |       |       |
| AVERAGE HUMIDITY %<br>% de HUMEDAD PROMEDIO  |                              |  |                                  | 37.76 %    |        |                             |      |       |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |       |       |  |        |        |   |       |       |
| OBSERVATIONS:<br>OBSERVACIONES:  |                              |  |                                  |            |        |                             |      |       |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |       |       |  |        |        |   |       |       |
| Turno: Diurno<br>Muestra tomada en talud del Borrow 4 para calificación de material como Zona 1, previo a combinación con cemento para estudios solicitados por KCB.   |                              |  |                                  |            |        |                             |      |       |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |       |       |  |        |        |   |       |       |
| LABORATORY TECHNICIAN<br>LABORATORISTA   |                              | SAMPLING DATE<br>FECHA TOMA DE MUESTRA   | TEST DATE<br>FECHA DE ENSAYO     |            |        |                             |      |       |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |       |       |  |        |        |   |       |       |
| Andrés Arrijos   |                              | 5-Feb-20   | 6-Feb-20                         |            |        |                             |      |       |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |       |       |  |        |        |   |       |       |
|  | PRINT NAME<br>NOMBRE IMPRESO | SIGNATURE<br>FIRMA   | DATE<br>FECHA                    |            |        |                             |      |       |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |       |       |  |        |        |   |       |       |
| LABORATORY LEADER<br>LÍDER DE LABORATORIO  | Kenny Moreira                |                | 10-Feb-20                        |            |        |                             |      |       |   |        |        |   |        |        |   |       |       |   |       |       |  |        |        |   |       |       |

GRANULOMETRIC ANALYSIS OF SOILS BY SIZING ASTM D 6913  
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO ASTM D 6913

ITR - 002 - 10 Rev 00

4 DIGIT 980

|   |               |  |                                  |       |        |
|---|---------------|--|----------------------------------|-------|--------|
| WBS / AREA:                             | 3801          | REPORT NUMBER:<br>NÚMERO DE REPORTE:                               | CI - 3801 - ITR - 13 - 0941      |       |        |
| LOCATION:<br>LOCALIZACIÓN:              | TSF           | SOURCE:<br>PROCEDENCIA:  | Borrow 4                         |       |        |
| SAMPLE N° - ZONE:<br>MUESTRA N° - ZONE: | ZONA 1 - 3139 | COORDINATES:<br>COORDENADAS:                                       | N 9584808.133 / E 773696.912     | PROF. | 0.30 m |
| STATION:<br>ABSCISA:                    | -             | SAMPLE DESCRIPTION (VSUAL):<br>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA (VISUAL): | Árcilla arenosa color café claro |       |        |
| LEVEL:<br>COTA:                         | 1452.783      |  |                                  |       |        |

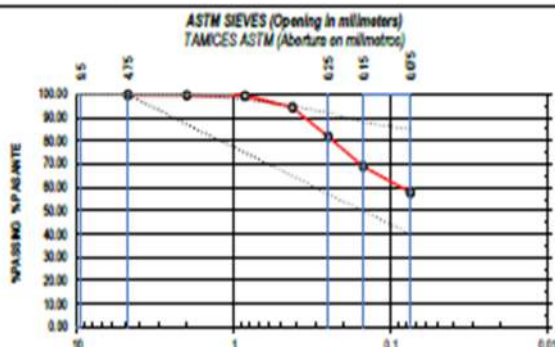
| Natural Moisture Content Test<br>Corresponding to<br>Ensayo de Contenido de Humedad Natural<br>Correspondiente a | N° Bowl<br>Fajinete N° | Test Mass<br>Humidity + Bowl<br>Masa de Muestra<br>Húmeda + Fajinete | Test Mass<br>Dry + Bowl<br>Masa de Muestra<br>Seca + Fajinete | Water Mass<br>Masa de Agua | Recipient Mass<br>Masa del Fajinete | Mass of Dry Test<br>Masa de Muestra<br>Seca | % Natural Moisture Content<br>% de Humedad Natural |
|--|------------------------|--|---|----------------------------|-------------------------------------|---|--|
| FINE SERIE<br>SERIE FINA   |                        |  |   |                            |                                     |   |  |

| N° SIEVE<br>TAMIZ N° | RETAINED MASS<br>MASA RETENIDA |                                 | ACCUMULATED PERCENTAGE<br>PORCENTAJES ACUMULADOS |                    |  | Specification (% Cumulative Passing)<br>Especificaciones (% Pesantes Acumulados Zona 1 TSF) |       |
|----------------------|--------------------------------|---------------------------------|--|--------------------|--|---|-------|
|                      | Partial gr.<br>Parcial g.      | Accumulated gr.<br>Acumulada g. | Retained<br>Retenido                             | Passing<br>Pasante | Corrected Passing<br>Pasante Corregido |   |       |
| 19. mm.              | 3/4"                           |                                 |  |                    |  |   |       |
| 12.5 mm.             | 1/2"                           |                                 |  |                    |  |   |       |
| 9.5 mm.              | 3/8"                           |                                 |  |                    |  |   |       |
| 4.75 mm.             | No. 4                          | 0.0                             | 0.00   | 0.0                | 100.0                                  |   | 100   |
| 2. mm.               | No. 10                         | 1.00                            | 1.00   | 0.3                | 99.7                                   | 87  | - 100 |
| 0.85 mm.             | No. 20                         | 1.00                            | 2.00   | 0.6                | 99.4                                   | 75  | - 98  |
| 0.425 mm.            | No. 40                         | 16.00                           | 18.00  | 5.6                | 94.4                                   | 65  | - 95  |
| 0.25 mm.             | No. 60                         | 41.00                           | 59.00  | 18.3               | 81.7                                   | 57  | - 92  |
| 0.15 mm.             | No. 100                        | 41.00                           | 100.00   | 31.0               | 69.0                                   | 50  | - 88  |
| 0.075 mm.            | No. 200                        | 36.00                           | 136.00   | 42.1               | 57.9                                   | 40  | - 85  |

Dry mass fine part:  
Masa Seca parte Fina: 323 g.

g.

|  |                                 |                     |
|--|---------------------------------|---------------------|
| Method:<br>Método de Ensayo  | Method:<br>Método               | Method:<br>Método   |
| Moisture<br>Humedad  | Moisture<br>Humedad             | Moisture<br>Humedad |
| State of material when tested<br>Estado del material al ensayar                                  |                                 |                     |
| Moisture<br>Humedad  |                                 |                     |
| At Dry<br>Hacia el Seco  |                                 |                     |
| State<br>Estado del Material   |                                 |                     |
| Specification - Characteristics of the material<br>Especificación - Características del material | Zone 1 Pasante Tamiz No.200-40% |                     |
| % Pasante Tamiz No.200   | 57.9                            | CUMPLE              |



OBSERVATIONS:  
OBSERVACIONES:

Muestra tomada en talud del Borrow 4 para calificación de material como Zona 1, previo a combinación con cemento para estudios solicitados por KCB.

|   |                                      |                              |
|---|--------------------------------------|------------------------------|
| LABORATORY TECHNICIAN<br>LABORATORIO      | SAMPLE DATE<br>FECHA TOMA DE MUESTRA | TEST DATE<br>FECHA DE ENSAYO |
| Andrés Armijos                            | 5-Feb-20                             | 6-Feb-20                     |
| PRINT NAME<br>IMPRIMA EL NOMBRE           | SIGNATURE<br>FIRMA                   | DATE<br>FECHA                |
| Kenny Moreira                             |                                      | 10-Feb-20                    |
| LABORATORY LEADER<br>LÍDER DE LABORATORIO |                                      |                              |

LIMIT ASSESSMENT FOR LIQUID, PLASTIC AND PLASTICITY INDEX - ASTM D 4318  
DETERMINACIÓN DE LÍMITE LÍQUIDO, PLÁSTICO, E ÍNDICE DE PLASTICIDAD - ASTM D 4318

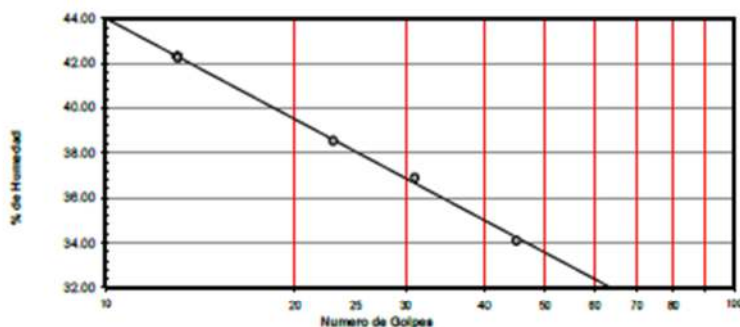
ITR -32 08 Rev 00

ÁREA 4 DIO SEO

|  |   |  |   |
|--|---|--|---|
| WBS/ÁREA:  | 3801  | REPORT NUMBER:<br>NÚMERO DE REPORTE      | CI - 3801 - ITR - 08 - 0988                     |
| LOCATION:<br>LOCALIZACIÓN:   | TSF   | SOURCE:<br>PROCEDENCIA:                  | Borrow 4  |
| SAMPLE TYPE:<br>TIPO DE MUESTRA:   | ZONA 1 - 3139                                 | ABSCISSA:<br>STATION:                    | -   |
| COORDINATE:<br>COORDENADAS:  | N 9584808.133 /E 773696.912<br>COTA: 1452.783 | SAMPLE DESCRIPTION (MISUAL):             | Arçilla arenosa color café claro                |
| PROCEDURE FOR PREPARING TEST SPECIMEN<br>PROCEDIMIENTO PARA PREPARACIÓN DE ESPÉCIMEN DE ENSAYO |   | WET PREPARATION<br>PREPARACIÓN EN HÚMEDO | DRY PREPARATION<br>PREPARACIÓN EN SECO <b>X</b> |

| LIQUID LIMIT<br>LÍMITE LÍQUIDO   |       |       |       |       |  |  |
|--|-------|-------|-------|-------|--|--|
| CONTAINER #<br>RECIPIENTE #  | 102   | 103   | 104   | 105   |  |  |
| CONTAINER MASS + HUMIDITY SAMPLE (P1)<br>MASA DE RECIPIENTE + MUESTRA HÚMEDA | 18.91 | 21.49 | 19.81 | 20.49 |  |  |
| CYLINDER MASS + DRY SAMPLE (P2)<br>MASA DE RECIPIENTE + MUESTRA SECA         | 15.94 | 17.66 | 16.31 | 16.55 |  |  |
| WATER MASS (P3 - P1 - P2)<br>MASA DE AGUA                                    | 2.97  | 3.83  | 3.50  | 3.94  |  |  |
| CONTAINER MASS (P4)<br>MASA DE RECIPIENTE                                    | 7.23  | 7.28  | 7.23  | 7.23  |  |  |
| DRY SAMPLE MASS (P5 - P2 - P4)<br>MASA DE MUESTRA SECA                       | 8.71  | 10.38 | 9.08  | 9.32  |  |  |
| HUMIDITY % (W = P3 * 100 / P3)<br>% DE HUMEDAD                               | 34.10 | 36.90 | 38.55 | 42.27 |  |  |
| # OF STRIKES<br># DE GOLPES  | 45    | 31    | 23    | 13    |  |  |

| PLASTIC LIMIT<br>LÍMITE PLÁSTICO   |       |       |       | Observaciones:<br>Observaciones:<br><br>Muestra tomada en talud del Borrow 4 para calificación de material como Zona 1, previo a combinación con cemento para estudios solicitados por KCB. |
|--|-------|-------|-------|---|
| CONTAINER #<br>RECIPIENTE #  | 60    | C4    | 22    |   |
| CONTAINER MASS + HUMIDITY SAMPLE (P1)<br>MASA DE RECIPIENTE + MUESTRA HÚMEDA | 16.32 | 15.63 | 16.02 |   |
| CYLINDER MASS + DRY SAMPLE (P2)<br>MASA DE RECIPIENTE + MUESTRA SECA         | 14.55 | 14.01 | 14.30 |   |
| WATER MASS (P3 - P1 - P2)<br>MASA DE AGUA                                    | 1.77  | 1.62  | 1.72  |   |
| CONTAINER MASS (P4)<br>MASA DE RECIPIENTE                                    | 7.25  | 7.22  | 7.20  |   |
| DRY SAMPLE MASS (P5 - P2 - P4)<br>MASA DE MUESTRA SECA                       | 7.30  | 6.79  | 7.10  |   |
| HUMIDITY % (W = P3 * 100 / P3)<br>% DE HUMEDAD                               | 24.25 | 23.86 | 24.23 |   |




| RESULTADOS / RESULTS              |    |
|-----------------------------------|----|
| L. Liquid =<br>L. Líquido         | 38 |
| L. Plastic =<br>L. Plástico       | 24 |
| L. Plasticity =<br>L. Plasticidad | 14 |

Clasificación Según: Carta de Plasticidad  
ASTM D2487 SUCS = CL

**CL**  
**ARCILLA DE BAJA PLASTICIDAD**

|   |               |  |            |                           |             |
|---|---------------|--|------------|---------------------------|-------------|
| LABORATORY TECHNICIAN<br>LABORATORISTA    | Kenny Moreira | SAMPLING DATE<br>FECHA TOMA DE MUESTRA | 5-Feb-2020 | TEST DATE<br>FECHA ENSAYO | 6-Feb-2020  |
| LABORATORY LEADER<br>LÍDER DE LABORATORIO | Kenny Moreira | SIGNATURE<br>FIRMA                     |            | DATE<br>FECHA             | 10-Feb-2020 |

| SPECIFIC GRAVITY OF THE SOIL WITH THE USE OF THE PYCNOMETER ASTM D854   |  | GRAVEDAD ESPECIFICA DEL SUELO CON EL USO DEL PICNÓMETRO ASTM D854      |  | ITR - 32 - 14                | Rev 00   |             |
|---|--|--|--|------------------------------|--|-------------|
|   |  |  | AREA   | 4 DIGIT SEQ                  |  |             |
| WBS / ÁREA:   | 3801   | REPORT NUMBER:<br>NÚMERO DE REPORTE:                                   | CI - 3801 - ITR - 14 - 0574  |                              |  |             |
| LOCATION:<br>LOCALIZACIÓN:  | TSF  | SOURCE:<br>PROCEDENCIA:  | Borrow 4   |                              |  |             |
| ZONE-SAMPLE N°<br>ZONA-MUESTRA N°   | ZONA 1 - 3139                                  | ABSCISSA:<br>ABSCISA:  | -  | Prof:                        | 0.30 m   |             |
| COORDINATES:<br>COORDENADAS:<br>LEVEL:<br>COTA:   | N 9584808.133 / E 773696.912<br>COTA: 1452.783 | SAMPLE DESCRIPTION (VISUAL):<br>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA<br>(VISUAL): | Arcilla arenosa color café claro   |                              |  |             |
| <b>TEST DATA</b><br>DATOS DEL ENSAYO  |  |  |  |                              |  |             |
| TEST N°<br>N° DE ENSAYO   |  |  |  |                              |  |             |
| PYCNOMETER CALIBRATED N°<br>N° DE PICNÓMETRO CALIBRADO  |  |  | 1  | 2                            | <b>P<br/>R<br/>O<br/>M<br/>E<br/>D<br/>I<br/>O</b> |             |
| PYCNOMETER MASS<br>MASA DEL PICNÓMETRO  |  | A gr.  | 84.62  | 82.26                        |  |             |
| PYCNOMETER MASS + WATER<br>MASA DEL PICNÓMETRO + AGUA   |  | B gr.  | 334.02   | 331.62                       |  |             |
| TEMPERATURE<br>TEMPERATURA  |  | (T) °C   | 21.50  | 21.50                        |  |             |
| PYCNOMETER VOLUME V = B - A<br>VOLÚMEN DEL PICNÓMETRO V = B - A   |  | V cm <sup>3</sup>  | 249.40   | 249.36                       |  |             |
| PYCNOMETER MASS + WATER + TEST<br>MASA DEL PICNÓMETRO + AGUA + MUESTRA  |  | C gr.  | 371.47   | 369.01                       |  |             |
| TEST MASS<br>MASA DE LA MUESTRA   |  | MA gr.   | 60.00  | 60.00                        |  |             |
| TEMPERATURE CORRECTION FACTOR<br>FACTOR DE CORRECCIÓN POR TEMPERATURA   |  | K  | 0.9997   | 0.9997                       |  |             |
| SPECIFIC GRAVITY OF THE SOIL<br>GRAVEDAD ESPECIFICA DEL SUELO   |  | G <sub>s</sub> gr/cm <sup>3</sup>                                      | 2.66   | 2.65                         |  | <b>2.66</b> |
| <b>FÓRMULA</b>  |  |  |  |                              |  |             |
| $G_s = \frac{MA}{B + MA - C} \times K$  |  |  |  |                              |  |             |
| OBSERVATIONS<br>OBSERVACIONES:<br><br>Tumo: Diurno<br>Muestra tomada en talud del Borrow 4 para calificación de material como Zona 1, previo a combinación con cemento para estudios solicitados por KCB. |  |  |  |                              |  |             |
| LABORATORY TECHNICIAN<br>LABORATORISTA  |  | SAMPLE DATE<br>FECHA TOMA DE MUESTRA                                   |  | TEST DATE<br>FECHA DE ENSAYO |  |             |
| Kenny Moreira   |  | 5-Feb-2020   |  | 7-Feb-2020                   |  |             |
| LABORATORY LEADER<br>LÍDER DE LABORATORIO   |  | PRINT NAME<br>IMPRIMA EL NOMBRE  | SIGNATURE<br>FIRMA   | DATE<br>FECHA                |  |             |
| Kenny Moreira   |  |  |  | 10-Feb-2020                  |  |             |

GRANULOMETRY USING A HYDROMETER (#200 THROUGH-HOLE SIEVE) - ASTM D 7928  
 GRANULOMETRÍA MEDIANTE EL USO DEL HIDRÓMETRO (PASANTE TAMIZ #200) - ASTM D 7928

TR-032-06

Rev 01

PAG 1/3

4 DIGIT 8EQ

|                                   |               |   |                                  |       |        |
|-----------------------------------|---------------|---|----------------------------------|-------|--------|
| WBSAREA:                          | 3801          | REPORT NUMBER<br>NÚMERO DE REPORTE                                | CI - 3801 - 032 - 06 - 0542      |       |        |
| LOCATION:<br>LOCALIZACIÓN:        | TSF           | SOURCE:<br>PROCEDECENCIA:   | Borrow 4                         |       |        |
| ZONE-SAMPLE N°<br>ZONA-MUESTRA N° | ZONA 1 - 3139 | COORDINATES:<br>COORDENADAS:                                      | N 9584808.133<br>E 773696.912    | PROF. | 0.30 m |
| STATION:<br>ABSCISA:              | -             | SAMPLE DESCRIPTION (VSUAL):<br>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA (VSUAL): | Arcilla arenosa color café claro |       |        |
| LEVEL:<br>NIVEL:                  | 1452.78       |   |                                  |       |        |

**SAMPLE DATA  
DATOS DE ENSAYO**


|   |       |  |   |       |
|---|-------|--|---|-------|
| HYDROMETER TYPE:<br>HIDRÓMETRO TPO:       | 151-H | **Lecture de compensación del hidrómetro en la solución de referencia a la misma temperatura que r m | MENISCUS CORRECTION, Cmc<br>CORRECCION POR MENISCO: | 1     |
| DRY SOIL MASS:<br>MASA DE SUELO SECO (Mg) | 50.66 |  | % DISPERSANT<br>% DISPERSANTE                       | 5     |
| Gs:                                       | 2.66  | OIL SEDIMENTATION No:<br>CIL. SEDIMENTACIÓN No:  | #200 THROUGH-HOLE SIEVE %:<br>PASANTE TAMIZ #200 %: | 57.89 |

| HOOR<br>HORA | ELAPSED TIME<br>TIEMPO<br>TRANSCURRIDO<br>(min) | HYDROMETER READING IN<br>SUSPENSION<br>LECTURA HIDRÓMETRO EN<br>SUSPENSIÓN<br>rm | TEMPERATURE<br>TEMPERATURA<br>(°C) | HYDROMETER OFFSET READING<br>LECTURA DE COMPENSACIÓN<br>DEL HIDRÓMETRO **<br>rdm | EFFECTIVE DEPTH<br>PROFUNDIDAD EFECTIVA<br>Hm (cm) | PARTICLE<br>DIAMETER<br>DIÁMETRO DE LA<br>PARTÍCULA<br>Dm (cm) | MASS PERCENT FINER<br>MASA MÁS FINA EN<br>PORCENTAJE<br>Nm (%) |
|--------------|---|--|------------------------------------|--|--|--|--|
| 9:21         | 1   | 1.03300  | 20.0                               | 1.00576  | 7.44   | 0.0371   | 85   |
| 9:22         | 2   | 1.03250  | 20.0                               | 1.00576  | 7.58   | 0.0265   | 84   |
| 9:24         | 4   | 1.02950  | 20.0                               | 1.00576  | 8.41   | 0.0197   | 74   |
| 9:28         | 8   | 1.02700  | 20.0                               | 1.00576  | 9.11   | 0.0145   | 66   |
| 9:35         | 15  | 1.02350  | 20.0                               | 1.00576  | 10.08  | 0.0111   | 55   |
| 9:50         | 30  | 1.02050  | 20.0                               | 1.00576  | 10.91  | 0.0082   | 46   |
| 10:20        | 60  | 1.01800  | 20.0                               | 1.00576  | 11.61  | 0.0060   | 38   |
| 11:20        | 120   | 1.01550  | 20.0                               | 1.00576  | 12.30  | 0.0044   | 30   |
| 13:20        | 240   | 1.01325  | 20.0                               | 1.00576  | 12.93  | 0.0032   | 23   |
| 17:20        | 480   | 1.01200  | 20.0                               | 1.00576  | 13.28  | 0.0023   | 20   |
| 9:20         | 1440  | 1.01050  | 20.0                               | 1.00576  | 13.69  | 0.0013   | 15   |

**OBSERVATIONS:**

Turno: Diurno

Muestra tomada en talud del Borrow 4 para calificación de material como Zona 1, previo a combinación con cemento para estudios solicitados por KCB.

|   |  |  |
|---|--|--|
| LABORATORY TECHNICIAN<br>LABORATORISTA    | SAMPLING DATE<br>FECHA TOMA DE MUESTRA   | SAMPLING START DATE<br>FECHA DE INICIO DE ENSAYO |
| Andrés Amijos                             | 5-Feb-20   | 9-Feb-20   |
| LABORATORY LEADER<br>LIDER DE LABORATORIO | PRINT NAME<br>NOMBRE IMPRESO   | SIGNATURE<br>FIRMA                               |
| Kenny Moreira                             |  | DATE<br>FECHA                                    |
|   |  | 10-Feb-20  |

GRANULOMETRY USING A HYDROMETER ( #200 THROUGH-HOLE SIEVE) - ASTM D 7928  
GRANULOMETRÍA MEDIANTE EL USO DEL HIDRÓMETRO (PASANTE TAMIZ #200) - ASTM D 7928

ITR - 002 - 08

Rev 00

PAG 2/3

4 DIGIT SEQ


|                                   |               |  |                                  |
|-----------------------------------|---------------|--|----------------------------------|
| WBS/AREA:                         | 3801          | REPORT NUMBER<br>NÚMERO DE REPORTE                                     | CI - 3801 - 032 - 06 - 0542      |
| LOCATION:<br>LOCALIZACIÓN:        | TSF           | SOURCE:<br>PROCEDENCIA:  | Borrow 4                         |
| ZONE-SAMPLE N°<br>ZONA-MUESTRA N° | ZONA 1 - 3139 | COORDINATES:<br>COORDENADAS:   | N 9584808.133<br>E 773696.912    |
| STATION:<br>ABSCISA:              | -             | SAMPLE DESCRIPTION (VISUAL):<br>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA<br>(VISUAL): | Arcilla arenosa color café claro |
| LEVEL:<br>NIVEL                   | 1452.78       |  |                                  |

ASTM D 6913 GRANULOMETRY (MATERIAL RETAINED IN #200 SIEVE)  
GRANULOMETRÍA ASTM D 6913 (MATERIAL RETENIDO EN TAMIZ # 200)

| SIEVE ASTM No<br>TAMIZ ASTM N° | OPENING<br>ABERTURA (mm) | PARTIAL MASS RETAINED<br>MASA RETENIDA PARCIAL | ACCUMULATED MASS<br>RETAINED<br>MASA RETENIDA<br>ACUMULADA | PERCENTAGE<br>RETAINED (%)<br>PORCENTAJE<br>RETENIDO (%) | PERCENTAGE<br>PASSED (%)<br>PORCENTAJE<br>QUE PASA (%) | PERCENTAGE PASSED<br>CORRECTED<br>PORCENTAJE QUE PASA<br>CORREGIDO |
|--------------------------------|--------------------------|--|--|--|--|--|
| #4                             | 4.75                     | 0.00   | 0.00   | 0.0  | 100.0  | 100.0  |
| #10                            | 2.00                     | 1.00   | 1.00   | 0.3  | 99.7   | 99.7   |
| #20                            | 0.85                     | 1.00   | 2.00   | 0.6  | 99.4   | 99.4   |
| #40                            | 0.420                    | 16.00  | 18.00  | 5.6  | 94.4   | 94.4   |
| #60                            | 0.250                    | 41.00  | 59.00  | 18.3   | 81.7   | 81.7   |
| #100                           | 0.150                    | 41.00  | 100.00   | 31.0   | 69.0   | 69.0   |
| #200                           | 0.074                    | 36.00  | 136.00   | 42.1   | 57.9   | 57.9   |
| DRY MASS<br>MASA SECA (gr)     |                          |  | 323.00   |  |  |  |

ASTM D 7928 GRANULOMETRY USING A HYDROMETER (MATERIAL RETAINED IN #200 SIEVE)  
GRANULOMETRÍA ASTM D 7928 MEDIANTE EL USO DEL HIDRÓMETRO (PASANTE TAMIZ #200)

|  |        |  |  |  |      |      |
|--|--------|--|--|--|------|------|
|  | 0.0371 |  |  |  | 85.2 | 49.3 |
|  | 0.0265 |  |  |  | 83.6 | 48.4 |
|  | 0.0197 |  |  |  | 74.2 | 43.0 |
|  | 0.0145 |  |  |  | 66.4 | 38.4 |
|  | 0.0111 |  |  |  | 55.5 | 32.1 |
|  | 0.0082 |  |  |  | 46.1 | 28.7 |
|  | 0.0060 |  |  |  | 38.3 | 22.2 |
|  | 0.0044 |  |  |  | 30.5 | 17.8 |
|  | 0.0032 |  |  |  | 23.4 | 13.8 |
|  | 0.0023 |  |  |  | 19.5 | 11.3 |
|  | 0.0013 |  |  |  | 14.8 | 8.6  |

|   |                                 |   |               |
|---|---------------------------------|---|---------------|
|   | PRINT NAME<br>IMPRIMA EL NOMBRE | SIGNATURE<br>FIRMA  | DATE<br>FECHA |
| LABORATORY LEADER<br>LÍDER DE LABORATORIO | Kenny Moreira                   |  | 10-Feb-20     |

GRANULOMETRY USING A HYDROMETER (#200 THROUGH-HOLE SIEVE) - ASTM D 7928  
GRANULOMETRÍA MEDIANTE EL USO DEL HIDRÓMETRO (PASANTE TAMIZ #200) - ASTM D 7928

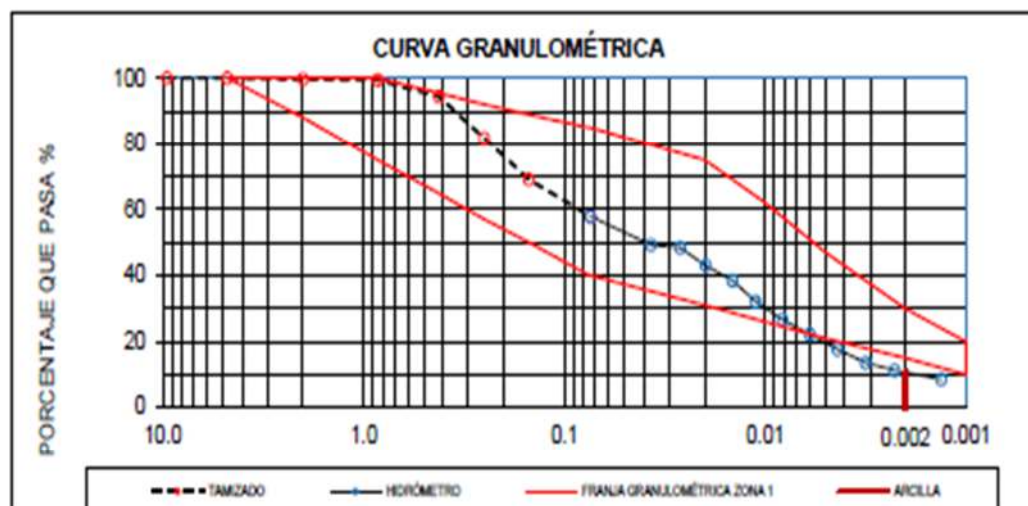
ITR - 032 - 08

Rev 00


PAG 3/3

4 DIGIT SEQ

|                                   |               |  |                                  |
|-----------------------------------|---------------|--|----------------------------------|
| WBS/ÁREA:                         | 3801          | REPORT NUMBER<br>NÚMERO DE REPORTE     | CI - 3801 - 032 - 06 - 0542      |
| LOCATION:<br>LOCALIZACIÓN:        | TSF           | SOURCE:<br>PROCEDENCIA:                | Borrow 4                         |
| ZONE-SAMPLE N°<br>ZONA-MUESTRA N° | ZONA 1 - 3139 | COORDINATES:<br>CORDENADAS:            | N 9584808.133<br>E 773696.912    |
| STATION:<br>ABSCISA:              | -             | SAMPLE DESCRIPTION<br>(VISUAL):        | Arcilla arenosa color café claro |
| LEVEL:<br>NIVEL                   | 1452.78       | DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA<br>(VISUAL): |                                  |



|               |                  |
|---------------|------------------|
| %SAND - ARENA | % FINES - FINOS  |
| 42.11         | 57.89            |
| % SILT - LIMO | % CLAY - ARCILLA |
| 47.35         | 10.54            |

|   |  |   |
|---|--|---|
| LABORATORY TECHNICIAN<br>LABORATORISTA    | SAMPLING DATE<br>FECHA TOMA DE MUESTRA | TEST DATE<br>FECHA DE ENSAYO  |
| Andrés Armijos                            | 5-Feb-20                               | 9-Feb-20  |
| LABORATORY LEADER<br>LÍDER DE LABORATORIO | PRINT NAME<br>IMPRIMA EL NOMBRE        | SIGNATURE<br>FIRMA  |
|   | Kenny Moreira                          |  |
|   |  | DATE<br>FECHA   |
|   |  | 10-Feb-20   |

| DETERMINING DISPERSIVE CHARACTERISTICS OF SOILS BY THE CRUMB TEST ASTM D 697-13<br>DETERMINACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE SUELOS MÉTODO DE LA MIGA ASTM D 697-13 |                               |  |   | ITR - 002 - 48   |                                  | Rev 00  |  |  |                               |
|---|-------------------------------|--|---|--|----------------------------------|---|--|--|-------------------------------|
| WBS / ÁREA:   |                               |  |   | 3801   |                                  | REPORT NUMBER:<br>NÚMERO DE REPORTE:                                |  |  |                               |
| LOCATION:<br>LOCALIZACIÓN:  |                               |  |   | TSF  |                                  | SOURCE:<br>PROCEDECENCIA:   |  |  |                               |
| SAMPLE N° - ZONE:<br>MUESTRA N° - ZONA:   |                               |  |   | ZONA 1- 3139   |                                  | COORDINATES:<br>COORDENADAS:  |  |  |                               |
| STATION:<br>ABSCISA:  |                               |  |   | -  |                                  | N: 9584808,133 E: 773696,912 PROF. 30cm                             |  |  |                               |
| LEVEL:<br>COTA:   |                               |  |   | 1452,783   |                                  | SAMPLE DESCRIPTION (VISUAL):<br>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA (VISUAL): |  |  |                               |
|   |                               |  |   |  |                                  | Arcilla arenosa color café claro                                    |  |  |                               |
| Natural Moisture Content Test<br>Corresponding to<br>Ensayo de Contenido de Humedad Natural   |                               | N° Bowl<br>Recipiente N°   | Test Mass<br>Humidity + Bowl<br>Masa de Muestra<br>Húmeda + | Test Mass<br>Dry + Bowl<br>Masa de Muestra<br>Seca +                       | Water Mass<br>Masa de Agua       | Recipient Mass<br>Masa del Recipiente                               | Mass of Dry<br>Test<br>Masa de Muestra | % Natural Moisture<br>Content<br>% de Humedad Natural                      |                               |
| FINE SERIE<br>SERIE FINA  |                               | LG-15  | 116,55  | 93,64  | 22,91                            | 31,5  | 62,14                                  | 36,9   |                               |
| FINE SERIE<br>SERIE FINA  |                               | LG-8   | 108,99  | 88,23  | 20,76                            | 31,99   | 56,24                                  | 36,9   |                               |
| Specimen Identification -<br>Identificación de Especimen:   |                               | 239  |   | Specimen Identification -<br>Identificación de Especimen:                  |                                  | 239   |  | Specimen Identification -<br>Identificación de Especimen:                  |                               |
| Container Identification -<br>Identificación de Recipiente:   |                               | 1  |   | Container Identification -<br>Identificación de Recipiente:                |                                  | 2   |  | Container Identification -<br>Identificación de Recipiente:                |                               |
| Method -<br>Método:   | A (Natural) - (Natural)       |  | Method -<br>Método:   | A (Natural) - (Natural)  |                                  | Method -<br>Método:   | A (Natural) - (Natural)                |  |                               |
|   | X B (Remolded) - (Remolded)   |  |   | X B (Remolded) - (Remolded)  |                                  |   | X B (Remolded) - (Remolded)            |  |                               |
| Water Type -<br>Tipo  | X Decided - Destilada         |  | Water Type -<br>Agua Tipo                                   | X Decided - Destilada  |                                  | Water Type -<br>Agua Tipo   | Decided - Destilada                    |  |                               |
|   | Type IV - Tipo IV             |  |   | Type IV - Tipo IV  |                                  |   | Type IV - Tipo IV                      |  |                               |
| Initial Water Temperature °C -<br>Temperatura Inicial del Agua °C:  |                               | 20   |   | Initial Water Temperature °C -<br>Temperatura Inicial del Agua °C:         |                                  | 20  |  | Initial Water Temperature °C -<br>Temperatura Inicial del Agua °C:         |                               |
| Start Time (hh:mm:ss) -<br>Hora de Inicio (hh:mm:ss):   |                               | 12:18  |   | Start Time (hh:mm:ss) -<br>Hora de Inicio (hh:mm:ss):                      |                                  | 12:18   |  | Start Time (hh:mm:ss) -<br>Hora de Inicio (hh:mm:ss):                      |                               |
| Target Reading<br>Tiempo Transcurrido   | Time Taken<br>Hora de Lectura | Grade -<br>Grado   | Temperature °C<br>Temperatura °C                            | Target Reading<br>Tiempo Transcurrido                                      | Time Taken<br>Hora de Lectura    | Grade -<br>Grado  | Temperature °C<br>Temperatura °C       | Target Reading<br>Tiempo Transcurrido                                      | Time Taken<br>Hora de Lectura |
| 2 m ± 15 s  | 12:16                         | 1  | 20  | 2 m ± 15 s   | 12:00                            | 1   | 20                                     | 2 m ± 15 s   |                               |
| 1 h ± 8 m   | 15:18                         | 1  | 20  | 1 h ± 8 m  | 13:20                            | 1   | 20                                     | 1 h ± 8 m  |                               |
| 6 h ± 45 m  | 18:20                         | 1  | 20  | 6 h ± 45 m   | 18:26                            | 1   | 20                                     | 6 h ± 45 m   |                               |
| Dispersive Classification -<br>Clasificación Dispersiva   |                               | Grado 1 no dispersivo  |   | Dispersive Classification -<br>Clasificación Dispersiva                    |                                  | Grado 1 no dispersivo   |  | Dispersive Classification -<br>Clasificación Dispersiva                    |                               |
| Additional Water Added to remold (method B)<br>Adición agua para remoldado  |                               | SI <input type="checkbox"/> NO <input checked="" type="checkbox"/> |   | Additional Water Added to remold (method B)<br>Adición agua para remoldado |                                  | SI <input type="checkbox"/> NO <input checked="" type="checkbox"/>  |  | Additional Water Added to remold (method B)<br>Adición agua para remoldado |                               |
| Remark -<br>Observaciones:  |                               |  |   |  |                                  |   |  |  |                               |
| Turno: Diurno<br>Muestra tomada del borrow 4 para calificación como material zona 1, previo a combinación con cemento para estudios solicitados por KCB.    |                               |  |   |  |                                  |   |  |  |                               |
| LABORATORY TECHNICIAN<br>LABORATORISTA  |                               |  |   |  | SAMPLE DATE<br>FECHA DE MUESTREO |   |  | TEST DATE<br>FECHA DE ENSAYO   |                               |
| Carlos Lara   |                               |  |   |  | 18/02/20                         |   |  | 19/2/2020  |                               |
| PRINT NAME<br>IMPRIMA EL NOMBRE   |                               |  |   |  | SIGNATURE<br>FIRMA               |   |  | DATE<br>FECHA  |                               |
| LABORATORY LEADER<br>LIDER DE LABORATORIO   |                               |  |   |  | Rolando Gómez                    |   |  | 19/2/2020  |                               |

DETERMINING DISPERSIVE CHARACTERISTICS OF SOILS BY THE CRUMM TEST ASTM D 6973-13  
DETERMINACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE SUELOS MÉTODO DE LA MIGA ASTM D 6973-13

ITR - 002 - 48

Rev 00

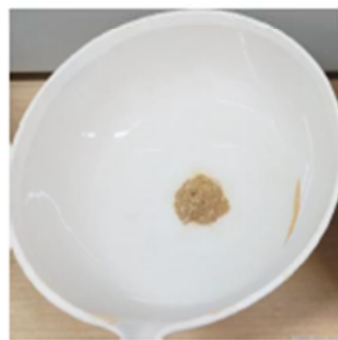
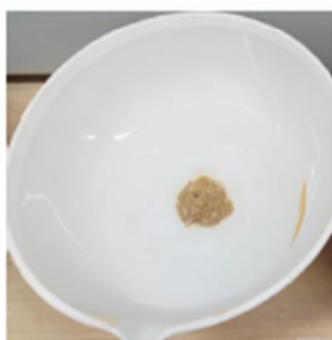
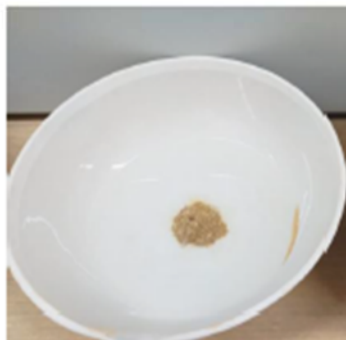
| WBS / ÁREA:                             |          | REPORT NUMBER:<br>NÚMERO DE REPORTE:                                | CI -                         | AREA  | 4 DIGIT SEQ |
|---|----------|---|------------------------------|-------|-------------|
| 3801                                    |          |   |                              | 3801  | 0008        |
| LOCATION:<br>LOCALIZACIÓN:              |          | SOURCE:<br>PROCEDENCIA:   | Borrow 4                     |       |             |
| TSF                                     |          |   |                              |       |             |
| SAMPLE N° - ZONE:<br>MUESTRA N° - ZONE: |          | COORDINATES:<br>COORDENADAS:  | N: 9584808,133 E: 773696,912 | PROF. | 30cm        |
| ZONA 1- 3139                            |          |   |                              |       |             |
| STATION:<br>ABSCISA:                    |          | SAMPLE DESCRIPTION (VISUAL):<br>DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA (VISUAL): |                              |       |             |
| -                                       |          | Árcilla arenosa color café claro                                    |                              |       |             |
| LEVEL:<br>COTA:                         | 1452,783 |   |                              |       |             |

**ENSAYO N° 1**

2 min

1 hora

6 horas



**ENSAYO N° 2**

2 min

1 hora

6 horas



|   |  |                                  |                              |
|---|--|----------------------------------|------------------------------|
| LABORATORY TECHNICIAN<br>LABORATORISTA    |  | SAMPLE DATE<br>FECHA DE MUESTREO | TEST DATE<br>FECHA DE ENSAYO |
| Cafre Lara                                |  | 18/02/20                         | 19/02/20                     |
| PRINT NAME<br>IMPRIMA EL NOMBRE           |  | SIGNATURE<br>FIRMA               | DATE<br>FECHA                |
| LABORATORY LEADER<br>LIDER DE LABORATORIO |  | Rolando Gómez                    | 19/02/20                     |

Número de muestras

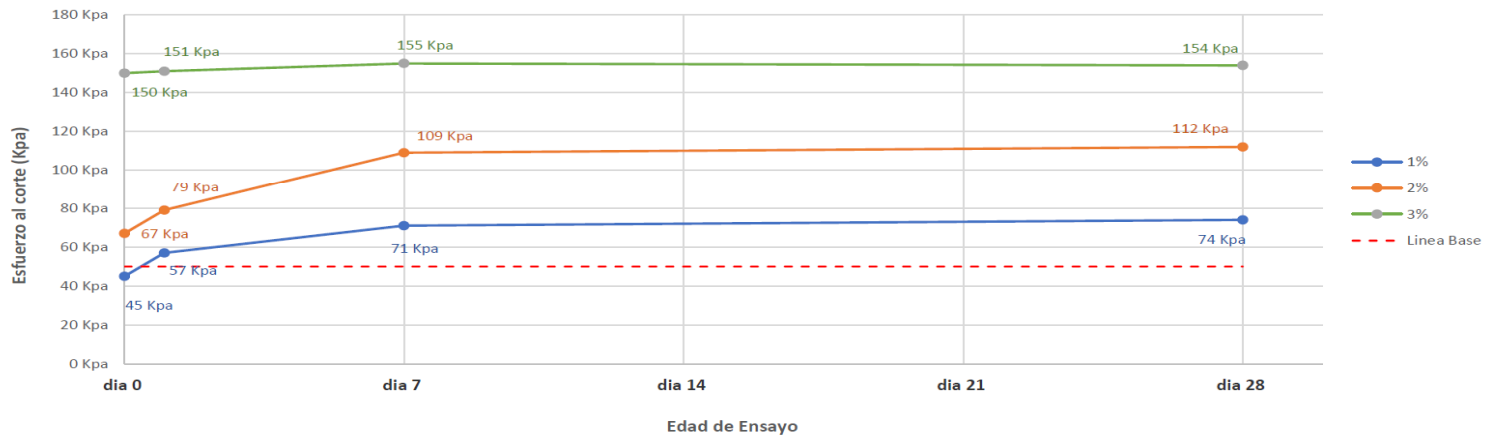
| NÚMERO DE MUESTRAS TOMADAS EN LA INVESTIGACIÓN DE SUELO CEMENTO |                                 |                    |                |                       |          |          | 3/10/2020 |   |
|---|---------------------------------|--------------------|----------------|-----------------------|----------|----------|-----------|---|
| Tipo de Suelo   | Porcentaje de humedad Natural % | Cantidad Cemento % | Edad de Ensayo | Localización Borrow 2 | Borrow 4 | Borrow 5 | Total     |   |
| Limo arenoso color café rojizo                                  | 33.24                           | 1%                 | día 0          | 2                     |          |          | 2         |   |
|   |                                 |                    | día 1          | 2                     |          |          | 2         |   |
|   |                                 |                    | día 7          | 2                     |          |          | 2         |   |
|   |                                 |                    | día 28         | 2                     |          |          | 2         |   |
|   |                                 | 2%                 | día 0          | 2                     |          |          |           | 2 |
|   |                                 |                    | día 1          | 2                     |          |          |           | 2 |
|   |                                 |                    | día 7          | 2                     |          |          |           | 2 |
|   |                                 |                    | día 28         | 2                     |          |          |           | 2 |
|   |                                 | 3%                 | día 0          | 2                     |          |          |           | 2 |
|   |                                 |                    | día 1          | 2                     |          |          |           | 2 |
|   |                                 |                    | día 7          | 2                     |          |          |           | 2 |
|   |                                 |                    | día 28         | 2                     |          |          |           | 2 |
| Arcilla arenosa color café claro                                | 37.74                           | 1%                 | día 0          |                       | 2        |          | 2         |   |
|   |                                 |                    | día 1          |                       | 2        |          | 2         |   |
|   |                                 |                    | día 7          |                       | 2        |          | 2         |   |
|   |                                 |                    | día 28         |                       | 2        |          | 2         |   |
|   |                                 | 2%                 | día 0          |                       | 2        |          |           | 2 |
|   |                                 |                    | día 1          |                       | 2        |          |           | 2 |
|   |                                 |                    | día 7          |                       | 2        |          |           | 2 |
|   |                                 |                    | día 28         |                       | 2        |          |           | 2 |
|   |                                 | 3%                 | día 0          |                       | 2        |          |           | 2 |
|   |                                 |                    | día 1          |                       | 2        |          |           | 2 |
|   |                                 |                    | día 7          |                       | 2        |          |           | 2 |
|   |                                 |                    | día 28         |                       | 2        |          |           | 2 |
| Limos arenoso color marrón                                      | 30.7                            | 1%                 | día 0          |                       |          | 2        | 2         |   |
|   |                                 |                    | día 1          |                       |          | 2        | 2         |   |
|   |                                 |                    | día 7          |                       |          | 2        | 2         |   |
|   |                                 |                    | día 28         |                       |          | 2        | 2         |   |
|   |                                 | 2%                 | día 0          |                       |          |          | 2         | 2 |
|   |                                 |                    | día 1          |                       |          |          | 2         | 2 |
|   |                                 |                    | día 7          |                       |          |          | 2         | 2 |
|   |                                 |                    | día 28         |                       |          |          | 2         | 2 |
|   |                                 | 3%                 | día 0          |                       |          |          | 2         | 2 |
|   |                                 |                    | día 1          |                       |          |          | 2         | 2 |
|   |                                 |                    | día 7          |                       |          |          | 2         | 2 |
|   |                                 |                    | día 28         |                       |          |          | 2         | 2 |
| Total   |                                 |                    |                | 24                    | 24       | 24       | 72        |   |

Esfuerzo de corte ensayo de veleta

| TABLA DE COMPARACIÓN ENTRE EL ESFUERZO DE CORTE Y TIEMPO DE SECADO |                                  |                       |                    |                |         |         |         |
|--|----------------------------------|-----------------------|--------------------|----------------|---------|---------|---------|
| Localización   | Tipo de Suelo                    | Humedad sin cemento % | Cantidad Cemento % | Inmediatamente | 1 días  | 7 días  | 28 días |
| Borrow 2   | Limo arenoso color café rojizo   | 33.24                 | 1%                 | 45 Kpa         | 57 Kpa  | 71 Kpa  | 74 Kpa  |
|  |                                  |                       | 2%                 | 67 Kpa         | 79 Kpa  | 109 Kpa | 112 Kpa |
|  |                                  |                       | 3%                 | 150 Kpa        | 151 Kpa | 155 Kpa | 154 Kpa |
| Borrow 4   | Arcilla arenosa color café claro | 37.74                 | 1%                 | 14 Kpa         | 21 Kpa  | 28 Kpa  | 34 Kpa  |
|  |                                  |                       | 2%                 | 21 Kpa         | 39 Kpa  | 55 Kpa  | 69 Kpa  |
|  |                                  |                       | 3%                 | 32 Kpa         | 93 Kpa  | 117 Kpa | 138 Kpa |
| Borrow 5   | Limos arenoso color marrón       | 30.70                 | 1%                 | 30 Kpa         | 31 Kpa  | 25 Kpa  | 43 Kpa  |
|  |                                  |                       | 2%                 | 35 Kpa         | 43 Kpa  | 57 Kpa  | 53 Kpa  |
|  |                                  |                       | 3%                 | 53 Kpa         | 94 Kpa  | 141 Kpa | 151 Kpa |

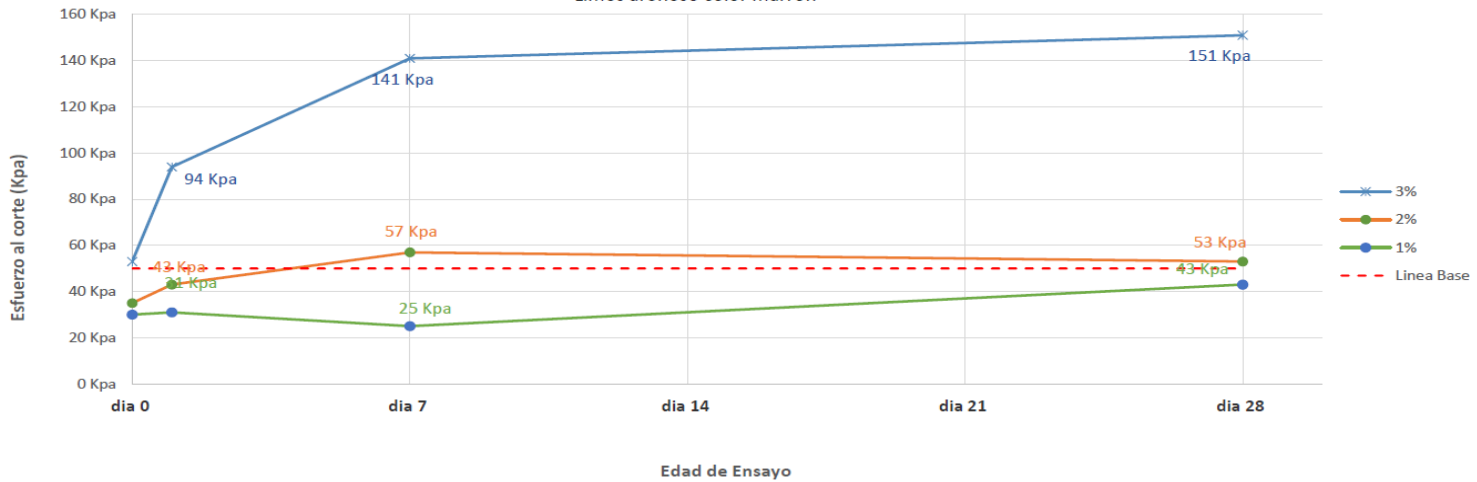
**TABLA DE COMPARACIÓN ENTRE EL ESFUERZO DE CORTE Y TIEMPO DE SECADO**

Limo arenoso color café rojizo



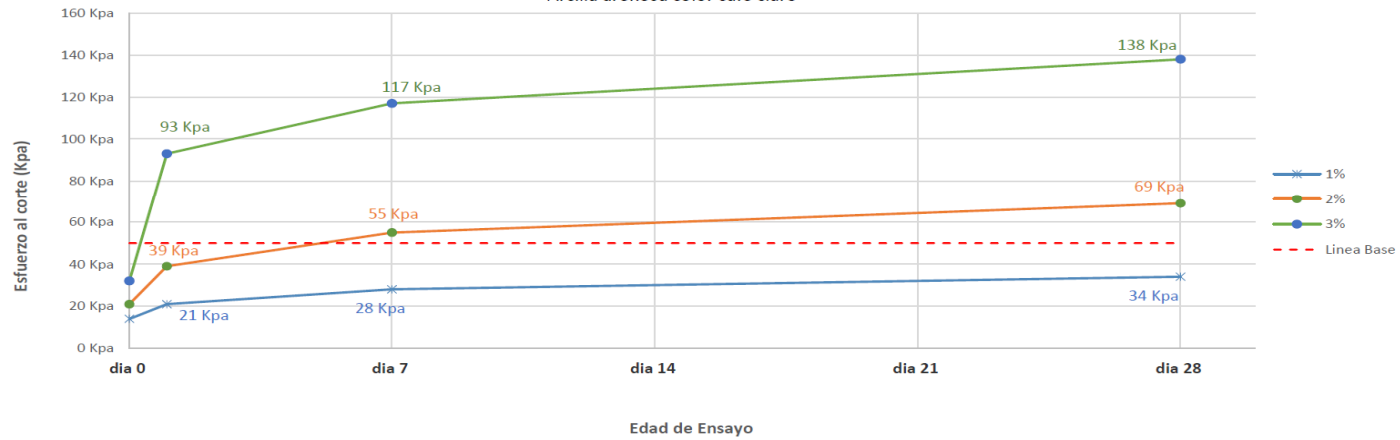
**TABLA DE COMPARACIÓN ENTRE EL ESFUERZO DE CORTE Y TIEMPO DE SECADO**

Limos arenoso color marrón



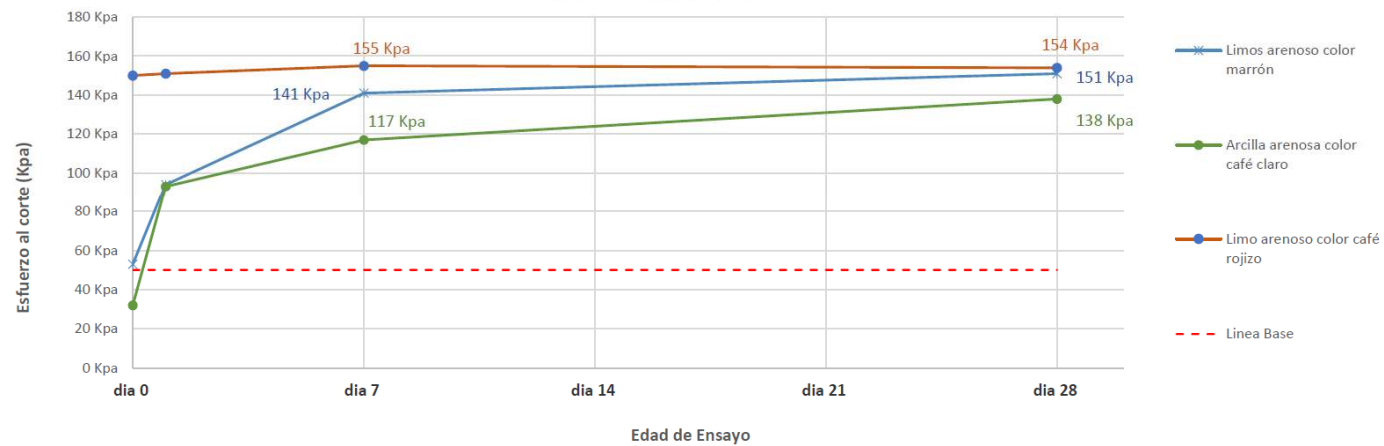
**TABLA DE COMPARACIÓN ENTRE EL ESFUERZO DE CORTE Y TIEMPO DE SECADO**

Arcilla arenosa color café claro



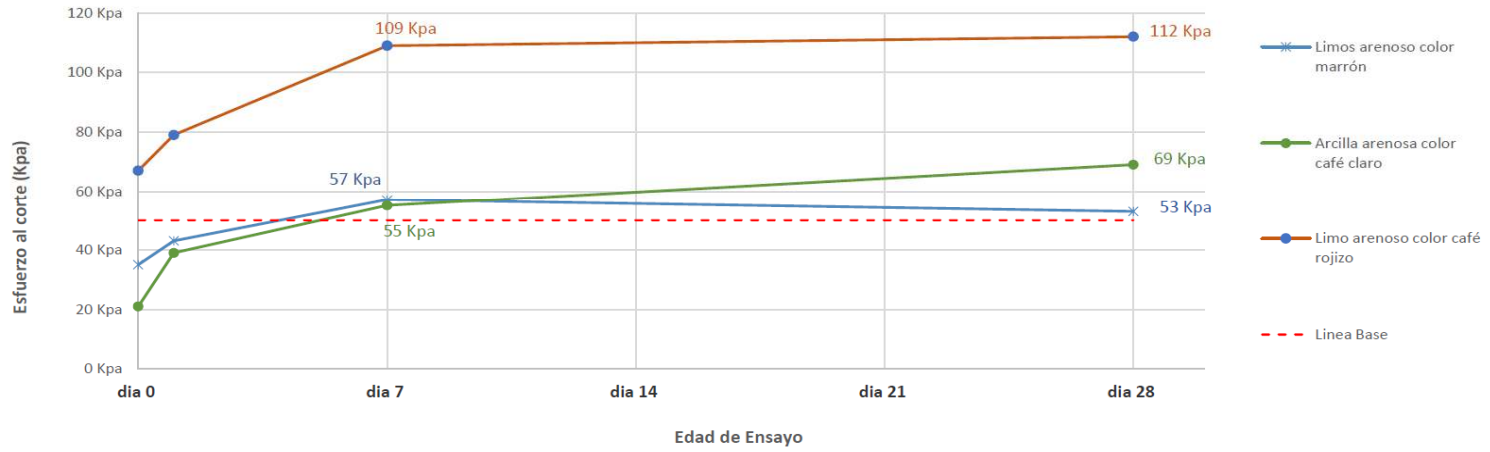
**TABLA DE COMPARACIÓN ENTRE EL ESFUERZO DE CORTE Y TIEMPO DE SECADO**

'Cantidad de cemento al 3%



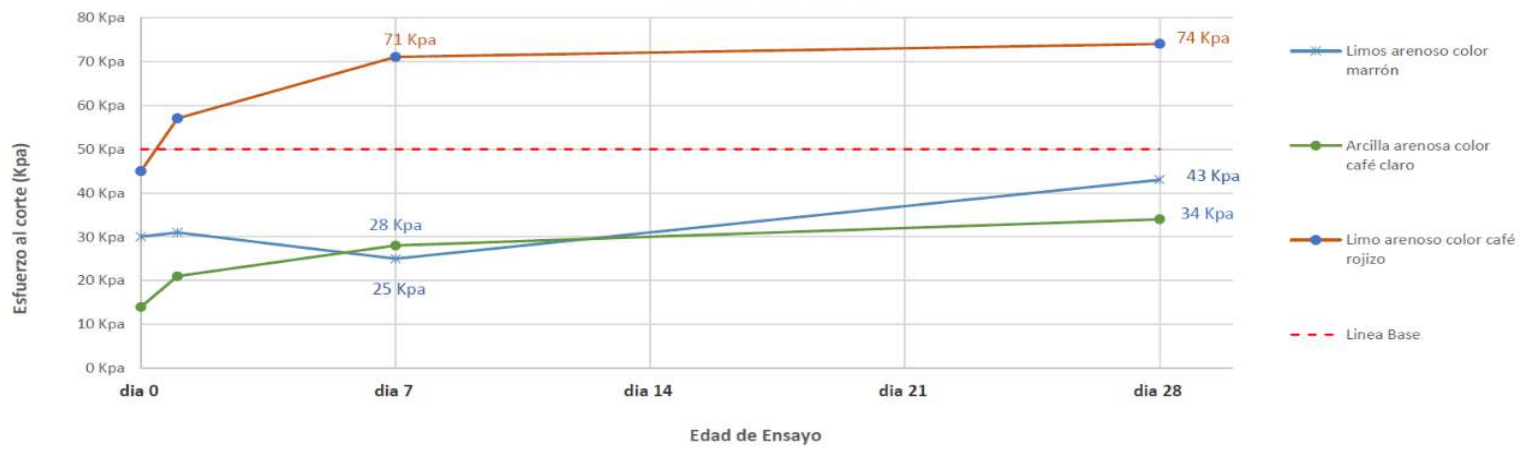
**TABLA DE COMPARACIÓN ENTRE EL ESFUERZO DE CORTE Y TIEMPO DE SECADO**

Cantidad de cemento al 2%

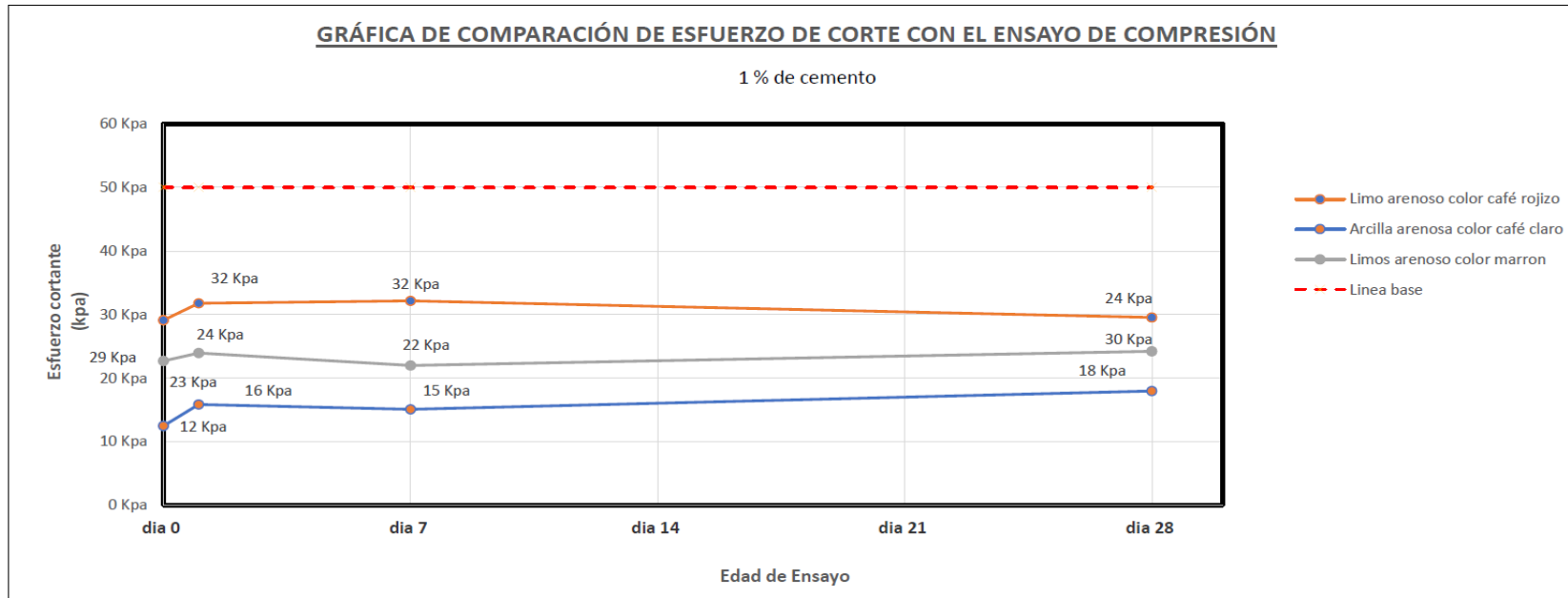


**TABLA DE COMPARACIÓN ENTRE EL ESFUERZO DE CORTE Y TIEMPO DE SECADO**

Cantidad de cemento al 1%

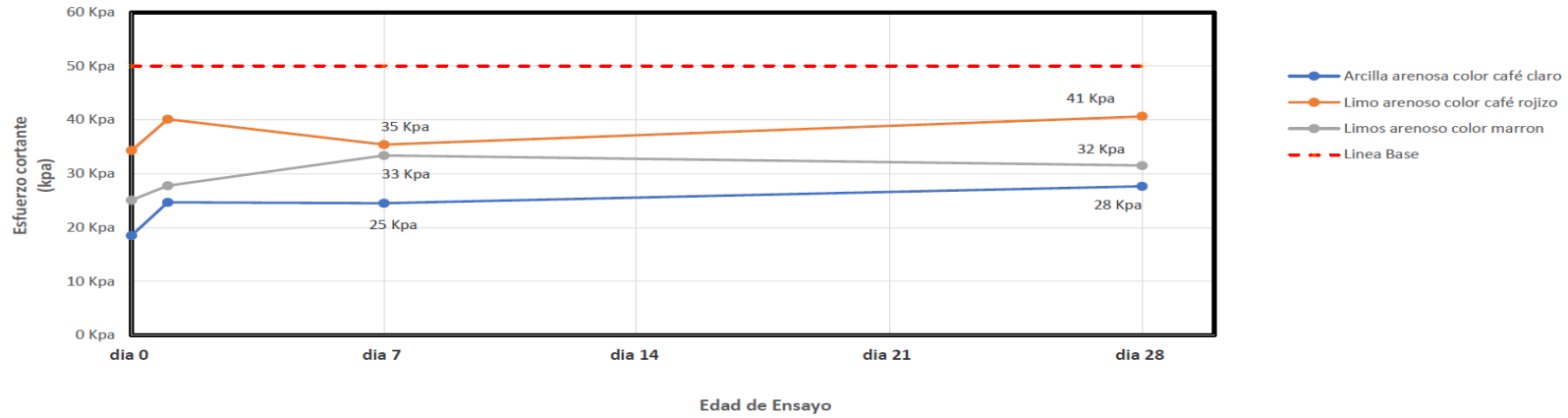


| TABLA DE COMPARACIÓN DE ESFUERZO DE CORTE CON EL ENSAYO DE COMPRESIÓN |                                  |                   |                    |        |        |        |        |
|---|----------------------------------|-------------------|--------------------|--------|--------|--------|--------|
| Localización  | Tipo de Suelo                    | Humedad Natural % | Cantidad Cemento % | dia 0  | dia 1  | dia 7  | dia 28 |
| Borrow 2  | Limo arenoso color café rojizo   | 33 %              | 1%                 | 29 Kpa | 32 Kpa | 32 Kpa | 30 Kpa |
|   |                                  |                   | 2%                 | 34 Kpa | 40 Kpa | 35 Kpa | 41 Kpa |
|   |                                  |                   | 3%                 | 47 Kpa | 47 Kpa | 52 Kpa | 52 Kpa |
| Borrow 4  | Arcilla arenosa color café claro | 38 %              | 1%                 | 12 Kpa | 16 Kpa | 15 Kpa | 18 Kpa |
|   |                                  |                   | 2%                 | 18 Kpa | 25 Kpa | 25 Kpa | 28 Kpa |
|   |                                  |                   | 3%                 | 22 Kpa | 37 Kpa | 42 Kpa | 43 Kpa |
| Borrow 5  | Limos arenoso color marron       | 31 %              | 1%                 | 23 Kpa | 24 Kpa | 22 Kpa | 24 Kpa |
|   |                                  |                   | 2%                 | 25 Kpa | 28 Kpa | 33 Kpa | 32 Kpa |
|   |                                  |                   | 3%                 | 37 Kpa | 46 Kpa | 54 Kpa | 55 Kpa |



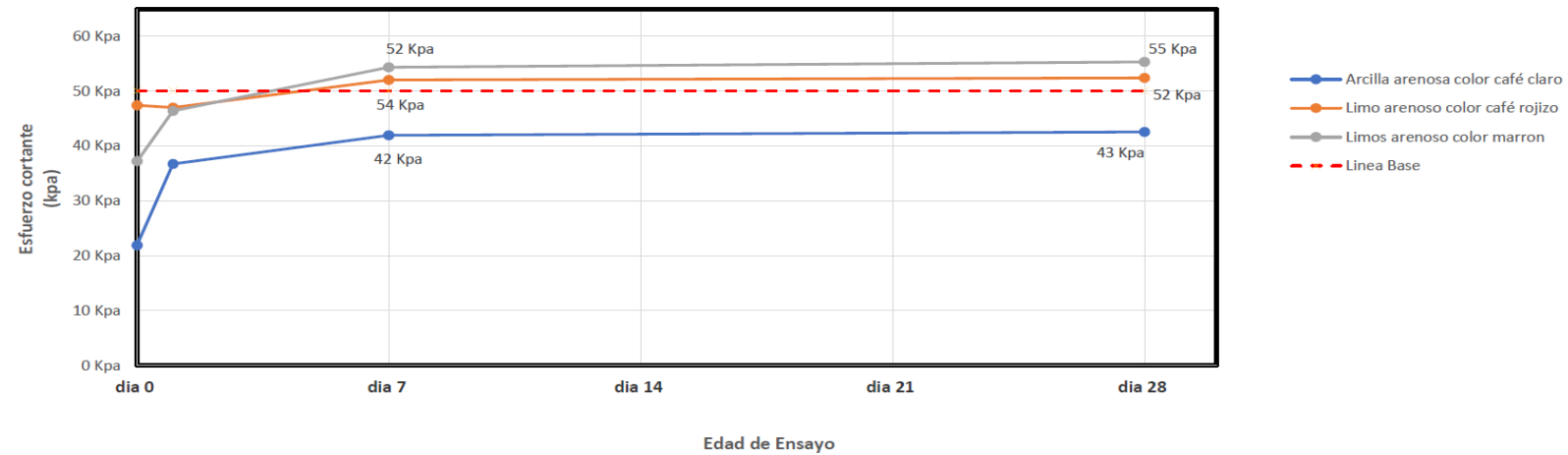
### GRÁFICA DE COMPARACIÓN DE ESFUERZO DE CORTE CON EL ENSAYO DE COMPRESIÓN

2% de cemento



### GRÁFICA DE COMPARACIÓN DE ESFUERZO DE CORTE CON EL ENSAYO DE COMPRESIÓN

3% de cemento



**TABLA DE COMPARACIÓN ENTRE EL ESFUERZO DE CORTE CON VELETA Y EL ESFUERZO DE CORTE CON EL ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE**

| Localización | Tipo de Suelo                    | Humedad sin cemento % | Cantidad Cemento % | Inmediatamente               |  | 1 días                       |  | 7 días                       |  | 28 días                      |  |
|--------------|----------------------------------|-----------------------|--------------------|------------------------------|--|------------------------------|--|------------------------------|--|------------------------------|--|
|              |                                  |                       |                    | Esfuerzo de corte con veleta | Esfuerzo de corte (Ensayo compresión simple) | Esfuerzo de corte con veleta | Esfuerzo de corte (Ensayo compresión simple) | Esfuerzo de corte con veleta | Esfuerzo de corte (Ensayo compresión simple) | Esfuerzo de corte con veleta | Esfuerzo de corte (Ensayo compresión simple) |
| Borrow 2     | Limo arenoso color café rojizo   | 33.24                 | 1%                 | 45 Kpa                       | 29 Kpa                                       | 57 Kpa                       | 32 Kpa                                       | 71 Kpa                       | 32 Kpa                                       | 74 Kpa                       | 30 Kpa                                       |
|              |                                  |                       | 2%                 | 67 Kpa                       | 34 Kpa                                       | 79 Kpa                       | 40 Kpa                                       | 109 Kpa                      | 35 Kpa                                       | 112 Kpa                      | 41 Kpa                                       |
|              |                                  |                       | 3%                 | 150 Kpa                      | 47 Kpa                                       | 151 Kpa                      | 47 Kpa                                       | 155 Kpa                      | 52 Kpa                                       | 154 Kpa                      | 52 Kpa                                       |
| Borrow 4     | Arcilla arenosa color café claro | 37.74                 | 1%                 | 14 Kpa                       | 12 Kpa                                       | 21 Kpa                       | 16 Kpa                                       | 28 Kpa                       | 15 Kpa                                       | 34 Kpa                       | 18 Kpa                                       |
|              |                                  |                       | 2%                 | 21 Kpa                       | 18 Kpa                                       | 39 Kpa                       | 25 Kpa                                       | 55 Kpa                       | 25 Kpa                                       | 69 Kpa                       | 28 Kpa                                       |
|              |                                  |                       | 3%                 | 32 Kpa                       | 22 Kpa                                       | 93 Kpa                       | 37 Kpa                                       | 117 Kpa                      | 42 Kpa                                       | 138 Kpa                      | 43 Kpa                                       |
| Borrow 5     | Limos arenoso color marrón       | 30.70                 | 1%                 | 30 Kpa                       | 23 Kpa                                       | 31 Kpa                       | 24 Kpa                                       | 25 Kpa                       | 22 Kpa                                       | 43 Kpa                       | 24 Kpa                                       |
|              |                                  |                       | 2%                 | 35 Kpa                       | 25 Kpa                                       | 43 Kpa                       | 28 Kpa                                       | 57 Kpa                       | 33 Kpa                                       | 53 Kpa                       | 32 Kpa                                       |
|              |                                  |                       | 3%                 | 53 Kpa                       | 37 Kpa                                       | 94 Kpa                       | 46 Kpa                                       | 141 Kpa                      | 54 Kpa                                       | 151 Kpa                      | 55 Kpa                                       |

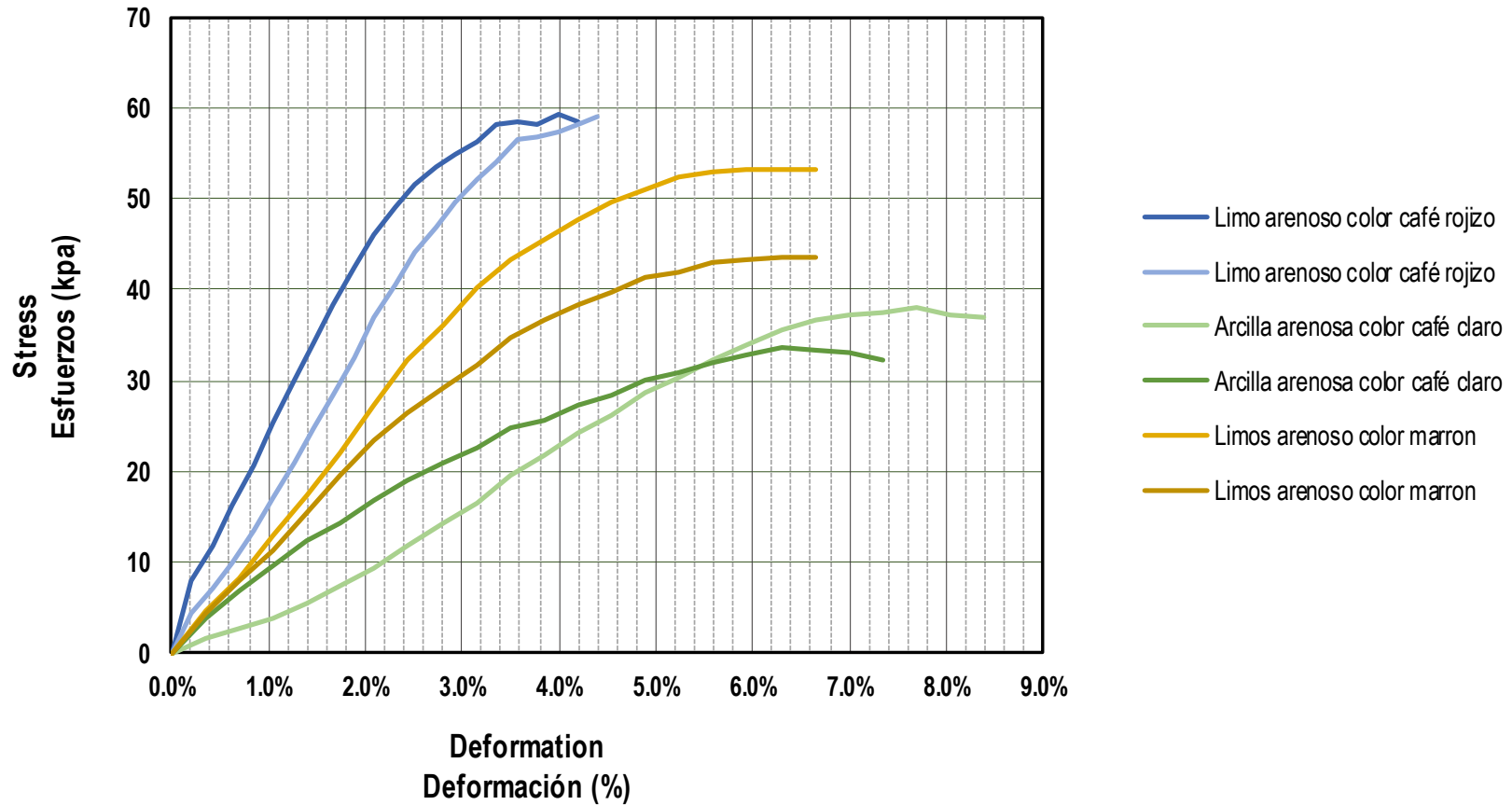
**TABLA PROMEDIO DE RESULTADOS ENTRE EL ESFUERZO DE CORTE CON VELETA Y EL ESFUERZO DE CORTE CON EL ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE**

| Localización | Tipo de Suelo                          | Inmediatamente               |  | 1 días                       |  | 7 días                       |  | 28 días                      |  |
|--------------|--|------------------------------|--|------------------------------|--|------------------------------|--|------------------------------|--|
|              |  | Esfuerzo de corte con veleta | Esfuerzo de corte (Ensayo compresión simple) | Esfuerzo de corte con veleta | Esfuerzo de corte (Ensayo compresión simple) | Esfuerzo de corte con veleta | Esfuerzo de corte (Ensayo compresión simple) | Esfuerzo de corte con veleta | Esfuerzo de corte (Ensayo compresión simple) |
| Borrow 2     | Limo arenoso color café rojizo Total   | 87 Kpa                       | 37 Kpa                                       | 96 Kpa                       | 40 Kpa                                       | 112 Kpa                      | 40 Kpa                                       | 113 Kpa                      | 41 Kpa                                       |
| Borrow 4     | Arcilla arenosa color café claro Total | 22 Kpa                       | 18 Kpa                                       | 51 Kpa                       | 26 Kpa                                       | 67 Kpa                       | 27 Kpa                                       | 80 Kpa                       | 29 Kpa                                       |
| Borrow 5     | Limos arenoso color marrón Total       | 39 Kpa                       | 28 Kpa                                       | 56 Kpa                       | 33 Kpa                                       | 74 Kpa                       | 37 Kpa                                       | 82 Kpa                       | 37 Kpa                                       |

# Graph Stress vs. Deformation Gráfico Esfuerzo vs. Deformación

Día 28

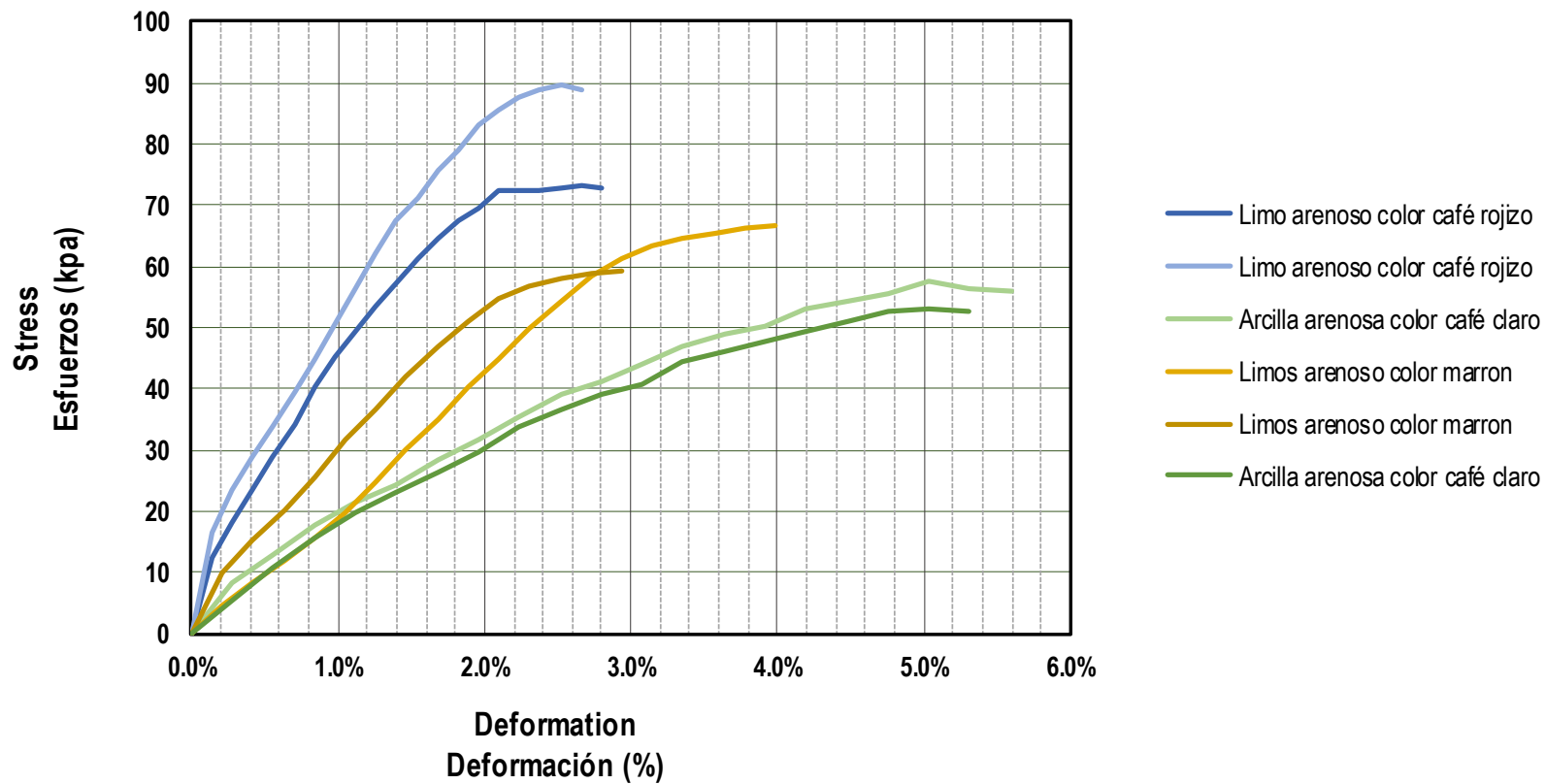
Porcentaje de cemento 1%



# Graph Stress vs. Deformation Gráfico Esfuerzo vs. Deformación

Día 28

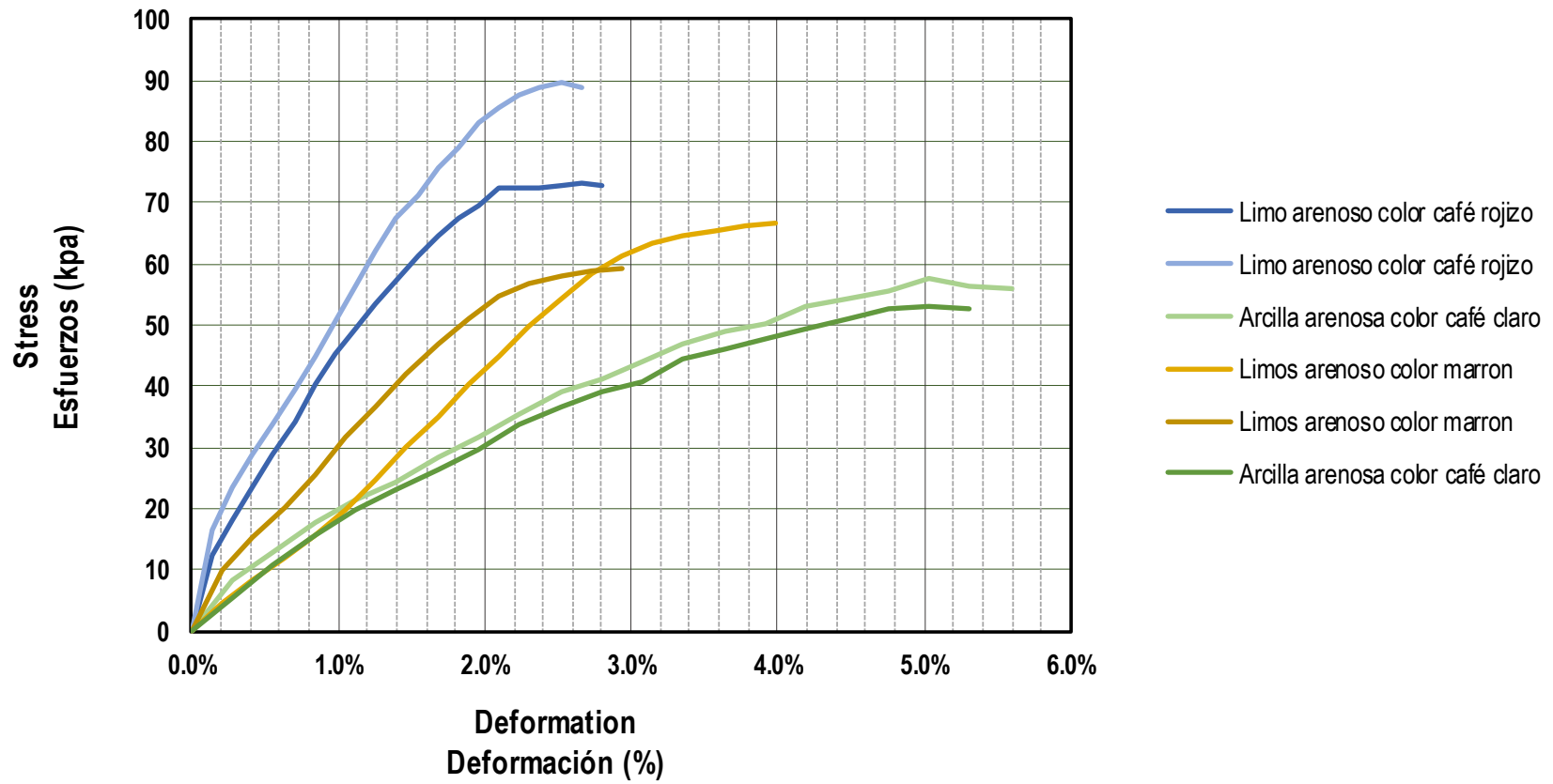
Porcentaje de cemento 2%



Día 28

### Graph Stress vs. Deformation Gráfico Esfuerzo vs. Deformación

Porcentaje de cemento 2%



# Graph Stress vs. Deformation Gráfico Esfuerzo vs. Deformación

Día 28

Porcentaje de cemento 3%

