

Estabilización mecánica del saprolito para uso como núcleo de baja permeabilidad de una presa de relaves bajo un entorno de selva tropical

Mechanical stabilisation of saprolite for use as a low permeability core of a tailings dam under a rainforest environment

Giancarlo Barquero

Lima, Klohn Crippen Berger S.A., Perú, gbarquero@klohn.com

Raúl Robles

Cuenca, KCB Ecuador Consulting S.A., Ecuador, robles@klohn.com

RESUMEN: Los suelos saprolíticos suelen tener un contenido de humedad natural entre un 10% y un 25% superior al contenido de humedad óptimo (OCH) de las pruebas Standard Proctor. Esta condición natural se traduce en una baja trabajabilidad, una resistencia al corte y una densidad de compactación reducidas, especialmente en entornos de alta pluviometría. Los métodos tradicionales de aireación o mezcla con suelos de menor contenido de humedad pueden ser complejos o no aplicables debido al clima y la humedad de las regiones tropicales. Además, el retrabajado del saprolito empeora su trabajabilidad, ya que estos suelos liberan el agua atrapada de la unión química de meteorización, lo que da lugar a un porcentaje de humedad aún mayor. Las condiciones adversas mencionadas se encontraron en un proyecto situado en la región de la selva amazónica en el norte de los Andes de Sudamérica, que están ligadas a precipitaciones sostenidas durante todo el año en un entorno sin estación "seca" establecida. El diseño de la presa de relaves consideró el saprolito como núcleo de baja permeabilidad aguas arriba; la construcción de este componente se identificó como la actividad crítica para completar la presa en el plazo previsto. Al principio de la construcción de la presa, una de las decisiones para mejorar la resistencia y trabajabilidad del saprolito fue mezclar este material con bajos porcentajes de cemento.

Este artículo resume las observaciones de campo utilizando cemento como aditivo para la estabilización mecánica del saprolito con el fin de mantener el progreso de la construcción de la presa. Además, este informe describe y asocia lo siguiente: la relación entre los resultados de los ensayos in situ y de laboratorio, los criterios para futuras orientaciones en un entorno climático similar, una descripción general del rendimiento de la mezcla de relleno, los retos para la zona de préstamo, la mezcla de materiales in situ, la gestión de las aguas superficiales, los equipos, las técnicas de construcción y el control de la compactación para garantizar la calidad.

ABSTRACT: Saprolite soils typically have a natural moisture content between 10% to 25% greater than the optimum moisture content of Standard Proctor tests. This natural condition results in low workability, reduced shear strength, and compaction density, especially in high-rainfall environments. Traditional methods of aeration or mixing with lower moisture content soils can be complex or not applicable due to the climate and humidity in tropical regions. Additionally, reworking saprolite worsens their workability as these soils release trapped water from the chemical weathering bond, resulting in an even higher percentage of moisture. Mentioned adverse conditions were encountered on a project located in the Amazon rainforest region in the northern Andes of South America, which are tied to sustained rainfall throughout the year in an environment with no established "dry" season. The design of the tailings dam considered the saprolite as a low permeability core upstream; the construction of this component was identified as the critical activity to complete the dam on schedule. At the beginning of the dam construction, one of the decisions to improve the strength and workability of the saprolite was to mix this material with low percentages of cement.

This article summarizes field observations using cement as an additive for mechanical stabilization of the saprolite to maintain the progress of the dam construction. Furthermore, this report describes and associates as follows: the relationship between results of in situ and laboratory tests, criteria for future guidance in a similar climatic environment, a general description of fill mixture performance, challenges for the borrow area, in situ material mixing, surface water management, equipment, construction techniques, and compaction control for quality assurance.

KEYWORDS: Saprolito, Cemento, Presa de relaves, Estabilización mecánica, Construcción.

1. INTRODUCCIÓN

La construcción de un núcleo de una presa es de alta complejidad, sobre todo si el material utilizado es saprolito (suelo residual que aún conserva gran parte de la estructura de la roca madre), sumado a que posee un contenido de humedad natural ($w\%$) mayor al óptimo contenido de humedad (OCH) del Proctor estándar. La construcción de este componente resulta en un problema mayor en regiones tropicales que sobrepasan los 3,400 mm de precipitación de promedio anual y sin periodos de época seca, porque generan un exceso en el contenido de humedad que no permitirá una adecuada compactación de las capas del material de saprolito y en consecuencia no se podrán alcanzar las resistencias requeridas. Esta condición provocará un retrabajo o reemplazo de las capas rechazadas, lo cual impactará directamente en el cronograma del proyecto.

Por lo tanto, este artículo discutirá el uso de porcentajes de cemento aplicado al suelo, como una alternativa para mejorar la resistencia, trabajabilidad y reducir la susceptibilidad a la lluvia en el saprolito durante la construcción del núcleo de baja permeabilidad. El periodo de construcción se llevó a cabo durante los años 2019 al 2021, siendo estos los periodos de construcción del Dique de Arranque (Starter Dam), Recrecimiento N°1 (Stage 1) y Recrecimiento N°2 (Stage 2) de una presa de relaves. Los trabajos en el núcleo de baja permeabilidad se adaptaron a las condiciones climáticas del sitio e incluyeron un mayor monitoreo de la construcción, pruebas de laboratorio avanzadas, pruebas de control de calidad en campo y coordinación entre diseñadores, supervisores de calidad y personal de construcción.

2. CARACTERÍSTICAS DEL SITIO

La presa de relaves se encuentra ubicada en la región de la selva amazónica en el norte de los Andes de América del Sur, caracterizado por tener un clima del tipo de selva tropical. La Figura 1 muestra la ubicación general del sitio con la distribución mundial simplificada de los suelos tropicales. En general, la temperatura media anual y la humedad relativa en el sitio es 17.5°C y 92% respectivamente. La precipitación mensual promedio durante el periodo de construcción fue de 285mm con una precipitación anual de 3608mm en el 2019, 3169mm en el 2020 y 2039mm a julio del 2021. El período de construcción del Dique de arranque fue entre enero y diciembre 2019, el Recrecimiento N°1 entre setiembre 2020 y abril 2021 y el Recrecimiento N°2 entre mayo y octubre 2021. En el sitio, la época húmeda se concentra en los meses de octubre a marzo, donde se presenciaron períodos de fuertes de precipitaciones sostenidas.

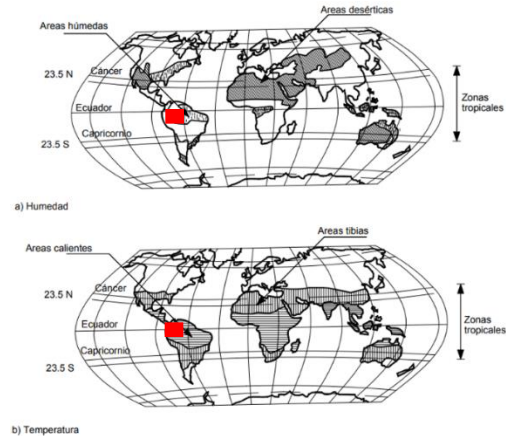


Figura 1. Distribución mundial de suelos residuales. El cuadro rojo marca el lugar donde se realizó la construcción de la presa. (Figura Título: Localización de las zonas tropicales y áreas tibias, en las cuales los suelos residuales son muy comunes. Fuente: Suarez (2009)

El sitio presenta una material orgánico (topsoil) de hasta 1m de profundidad. Los perfiles estratigráficos de la fundación de la presa de relaves se componen de un suelo residual delgado, conocido como laterita (de 0.5m a 1.0m), saprolito (hasta una profundidad promedio de 40 m) y una transición a roca madre fresca. El desgaste superficial masivo ocurre principalmente por la erosión hídrica de los arroyos sobre los suelos residuales. La erosión progresiva de las laderas del valle socava los puntos altos de arenisca, los cuales al ser arrastrados cuesta abajo generan matrices de material coluvial en el fondo del valle.

La gestión del agua superficial en el sitio es un desafío debido a la alta precipitación. El uso de relleno granular más grueso es posible bajo esta condición climática; sin embargo, la construcción del núcleo inclinado con material saprolito no lo es, por lo que no se permitió su construcción durante un período sostenido de lluvia.

3. CONFIGURACIÓN Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DE LA PRESA

La presa se compone aguas abajo, de un relleno de roca que soporta: (i) dos materiales granulares usados como filtros inclinados (arena y gravas) y (ii) un núcleo inclinado de baja permeabilidad de saprolito. El diseño incluyó un revestimiento parcial con geomembrana de polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) como primera barrera ante potenciales filtraciones a través y debajo de la presa.

El relleno de saprolito fue utilizado para: (i) la conformación de una zanja de corte bajo la fundación (cut-off trench), donde se reemplazó el material existente (coluvial y saprolito más permeable) por saprolito compactado con menor permeabilidad y (ii) el núcleo inclinado aguas arriba. El objetivo principal de la incorporación del núcleo es proporcionar una barrera secundaria de baja permeabilidad para reducir la filtración a través y debajo de la presa. La estabilidad del material depende de la capacidad de compactarlo en condiciones no drenadas, así como de la tasa de disipación de la presión de poro en el material. El material de relleno de saprolito fue obtenido dentro del área del embalse de la presa de relaves.

La configuración del dique y los recrecimientos se presentan en la siguiente figura.

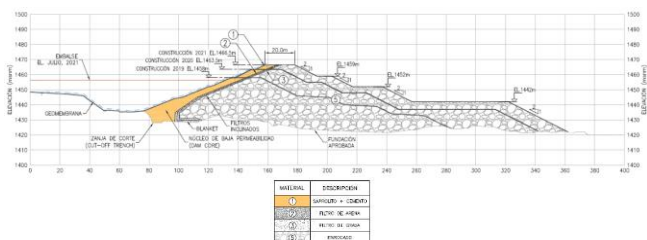


Figura 2. Configuración de la presa de relaves.

El saprolito fue denominado en el proyecto como Zona 1. Las propiedades físicas y el comportamiento mecánico del material conformado fueron estudiadas a partir de una prueba del material en campo (test-fill). Debido a la poca extensión del área de ejecución para el test-fill, las recomendaciones de este no pudieron replicarse durante la construcción debido al comportamiento y las dificultades de conformación del material. En función a los hallazgos, tomando en consideración la extensión de las áreas ensayadas, se realizaron recomendaciones posteriores al estudio, las cuales fueron establecidas en las especificaciones del proyecto, y se indican a continuación:

- Contenido de humedad menor al 38%.
- Granulometría de acuerdo con el Huso especificado. (Ver Figura 3).
- Resistencia al corte no drenado no menor a 50kPa medida mediante el ensayo de veleta de corte manual del material conformado.
- El material deberá alcanzar el 100% de la máxima densidad seca del ensayo de Proctor Standard con la corrección de estimación a un solo punto correspondiente al contenido de humedad natural.

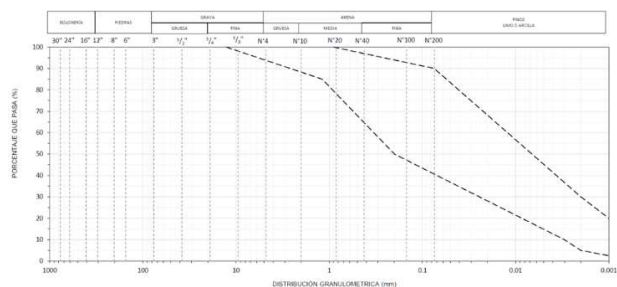


Figura 3. Huso Granulométrico del Saprolito en base a las características de las áreas de préstamo

El material utilizado fue obtenido de tres Áreas de Préstamo ubicadas dentro del embalse de la presa de relaves. La descripción del material según cada área de préstamo es:

- Borrow 2: Suelo residual limo arenoso de baja plasticidad, color café rojizo, húmedo, homogéneo.
- Borrow 4: Suelo residual arcilla arenosa de baja plasticidad, color café claro, húmedo, homogéneo.
- Borrow 5: Suelo residual limo arenoso de baja plasticidad, color marrón, húmedo, homogéneo.

Las propiedades índice de las áreas de préstamo se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 1. Áreas de préstamo de saprolito y resultados de caracterización geotécnica.

Área de préstamo	Contenido de humedad (%)	Granulometría			Límites de Atterberg		
		Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)	LP	LL	IP
Borrow 2	31.06	0.4	42.4	57.2	27	37	10
Borrow 4	34.37	0.1	36.2	63.7	28	38	10
Borrow 5	30.21	0.4	41.1	58.6	27	37	10

Nota: Cada área de préstamo fue empleada independientemente.

4. EVALUACIÓN DE LA MEZCLA SUELO – CEMENTO EN LABORATORIO

4.1 Condición inicial del saprolito sin adición de cemento

4.1.1 Densidad húmeda en campo

Tal como se muestra en la Tabla 1, todo el material presenta un alto contenido de humedad, uno de los factores determinantes que perjudicaban la conformación adecuada del material era que el contenido de humedad natural estaba muy por encima del contenido óptimo de humedad obtenido del ensayo Proctor Estándar. La humedad natural excede en 10% (en promedio) la humedad óptima, además, como se indica más adelante, la hidratación del cemento es insuficiente para reducir el exceso de contenido de humedad.

4.1.2 Resistencia al corte sin cemento

Las cuatro primeras capas (de 1,2 m de espesor en total) de saprolito colocadas sin cemento en la zanja de corte mostraron una resistencia al corte no drenado (S_u) entre 26 kPa y 68 kPa (40 kPa de promedio). La reparación de las capas fallidas hizo que el progreso de la colocación del relleno fuera lento. Para mejorar el avance de la construcción, se recomendó mezclar el relleno de saprolito con 3% a 4.5% de cemento (en volumen) para mejorar la trabajabilidad y reducir la sensibilidad del saprolito a la saturación.

4.2 Resultados de la mezcla saprolito/cemento realizados en laboratorio

Esta sección se enfoca en investigar en laboratorio las características de la mezcla saprolito-cemento. Los objetivos de este programa fueron:

- Obtener parámetros de resistencia al corte y resistencia a la compresión de acuerdo con las humedades naturales de las diferentes áreas de préstamo;
- Idealizar los tiempos de fraguado con la finalidad de evaluar la expectativa de incremento de resistencia al corte en el tiempo;
- Identificar las variaciones de las propiedades índices del material; y

- Definir valores de cemento mínimos en volumen para utilizar en campo.

4.2.1 Cantidad de cemento y tiempo de ensayo

Se utilizaron relaciones del 0.7%, 1.5%, 2.3%, 3.0%, 4.5% y 6.0% de la mezcla sapolito-cemento en volumen total de sapolito. Asimismo, para entender el proceso de aumento de resistencia, se tomaron periodos de fraguado correspondientes a mezclas de hormigón y morteros inmediatamente, a 1 hora, a 3 horas, a 1 día, a 3 días, a 7 días y a 28 días.

4.2.2 Extracción de la muestra de suelo

Se realizó de acuerdo con la norma ASTM D420 descrito en el siguiente procedimiento:

- Excavación del material superficial de aproximadamente 0.50 m, posteriormente se realiza una descripción visual del suelo.
- Recolección de muestras alteradas de aproximadamente 6 kg en fundas plásticas y saquillos de hilo, posteriormente son selladas herméticamente.
- Registro fotográfico e identificación de las muestras para su traslado al laboratorio.

4.2.3 Procedimiento del ensayo

4.2.3.1 Método de moldeo de muestra

Las muestras obtenidas de las áreas de préstamo fueron remodeladas en moldes de 71.1 mm de diámetro y 142.2 mm de altura, los cuales se prepararon siguiendo la normativa ASTM D1632.

Para realizar el moldeo se siguieron los siguientes pasos:

- Se ejecutan los ensayos índices de las muestras.
- Se realiza el Proctor Estándar de un punto a humedad natural. La densidad obtenida será la utilizada en cada molde.
- A las muestras se le añade la cantidad de cemento a evaluar, luego se combinan hasta obtener una mezcla homogénea.
- El material mezclado se coloca en el molde en tres capas compactadas, de acuerdo con la normativa ASTM D-698.
- Con la ayuda de un gato hidráulico se retiran las muestras del molde para su almacenamiento y curado hasta la realización de los ensayos de corte y compresión.

4.2.3.2 Curado y acondicionamiento de las muestras de prueba

El proceso de curado consistió en mantener la humedad del suelo protegiendo las muestras con bolsas plásticas con la finalidad de mitigar cambios de humedad por evaporación e intentar mantener su humedad de compactación como sucedería en campo cuando se realice la colocación del material en capas.

4.2.4 Resumen de resultados de las muestras sapolito-cemento

4.2.4.1 Contenido de humedad

Se analizó la variación del contenido de humedad con respecto al tiempo (ver Figura 4). Se observa que a los 7 días de fraguado la disminución del contenido de humedad natural no supera el 2%, es decir, a pesar del incremento de resistencia del material el contenido de humedad no presenta un cambio significativo

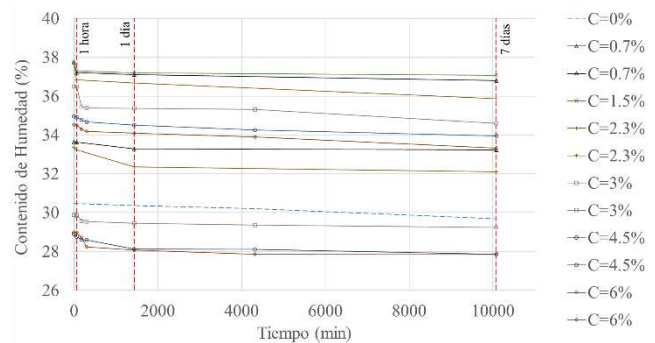


Figura 4. Variación de contenido de humedad en el tiempo

4.2.4.2 Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg fueron estimados en base a la norma ASTM 4318 y graficados en la Figura 8 de acuerdo con la carta de plasticidad representada en ASTM D2487. Se tomaron mediciones a diferentes contenidos de cemento ($c=3\%$, 4% y 6% en volumen) al 1, 7 y 28 días de mezclado. Los resultados iniciales del material sin cemento muestran un alto índice de plasticidad ($IP=18$), el cual se ve disminuido a un rango entre 8 y 11, independientemente del porcentaje de cemento añadido. Esta variación de IP se debe principalmente a un aumento en los valores del límite plástico (LP). Todas las muestras se muestran concentradas en el límite de lo que se clasifica como CL (Arcilla de baja plasticidad) y ML (Limo de baja plasticidad). Según la caracterización de Wesley (2010) el material resultante se encuentra clasificado en el rango de arcilla limosa.

4.2.4.3 Granulometría, hidrometría y dispersión.

En el estudio de la granulometría de suelo se utilizó las normas ASTM D6913 y D7928. Los materiales presentan un promedio de 55% del pasante #200 clasificándose como un material fino. En el análisis de dispersión se utilizó la norma ASTM 6572 (ASTM, 2021), la cual determinó que los materiales son de Grado 1 no dispersivos (Imagen 2).



Imagen 1. Ensayo de dispersión. Foto del ensayo a los 2 minutos, a 1 hora y a 6 horas de izquierda a derecha.

4.2.4.4 Esfuerzo al corte no drenado mediante el ensayo de veleta manual

El análisis de esfuerzo de corte se realizó en los moldes con material compactado de acuerdo con la norma ASTM D2573. Este ensayo mide la resistencia al corte no drenado del material mezclado en campo. De esta manera, los resultados obtenidos por este ensayo de veleta de corte manual se utilizan para aprobar y liberar las capas de material colocado. Por ello, en la Figura 5 se presenta un resumen de los resultados del esfuerzo de corte no drenado versus el tiempo de fraguado. Asimismo, se coloca la línea

base de 50 kPa como resistencia mínima de acuerdo con lo estipulado en las especificaciones técnicas del material.

La Figura 5 ha sido limitada a una duración mayor a 1 día con la finalidad de comparar visualmente el incremento de resistencia al corte en etapas tempranas del curado. Durante la ejecución, el tiempo de mezclado, carguío y conformación es un proceso que dura aproximadamente 1 hora.

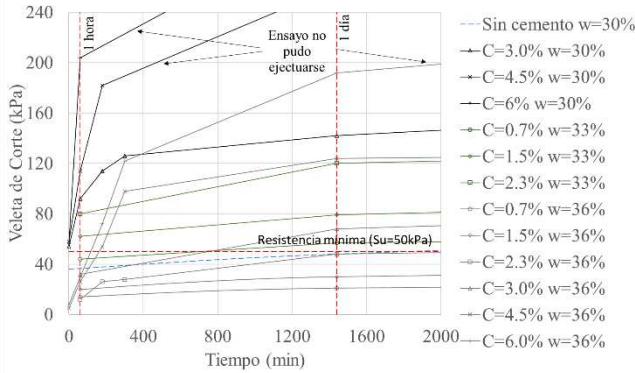


Figura 5. Gráfico de comparación esfuerzo de corte no drenado (veleta de corte) versus tiempo, para diferentes contenidos de humedad.

Notas C: Contenido de cemento en volumen, w: Contenido de humedad natural inicial.

De la Figura 5 se interpreta lo siguiente:

- Para las mezclas al 30% de contenido de humedad natural los resultados al 3% de cemento muestran una resistencia mucho mayor que el material sin cemento. Con la finalidad de cumplir el valor mínimo de aprobación de 50 kPa, para un contenido de humedad de 30%, lo mínimo recomendable es la adición de 3% de cemento en volumen de mezcla (valor mínimo ensayado para este contenido de humedad), ya que los resultados obtenidos están por encima de 50 kPa para una hora después de efectuada la mezcla.
- Para las mezclas al 33% de contenido de humedad natural los resultados al 0.7% de cemento muestran un aumento de resistencia similar al material sin cemento, siendo los resultados mayores con 1.5% y 2.3% de cemento. Con la finalidad de cumplir el valor mínimo de aprobación de 50kPa, para un contenido de humedad de 33% lo mínimo recomendable es la adición de 2.3% de cemento en volumen de mezcla (siendo el valor máximo ensayado), ya que los resultados pasados una hora de mezclado se visualizan encima de 50kPa para una hora después de efectuada la mezcla.
- Para las mezclas con 36% de humedad natural los resultados muestran una clara tendencia al incremento de su resistencia en el tiempo. Se puede observar que la mezcla al 2.3% de cemento tiene valores similares y la misma tendencia de incremento de resistencia que el material natural, aun teniendo 6% más de contenido de humedad. Con la finalidad de cumplir el valor mínimo de aprobación de 50kPa, para un contenido de humedad de 36% lo mínimo que se debería recomendar sería la adición de 4.5% de cemento en volumen de mezcla, mostrando incremento de resistencia mayor a los 50kPa indicados, a partir de la 3 horas.

- Todos los ensayos de veleta de corte manual presentan un incremento de la resistencia independientemente de la cantidad del cemento. Se puede inferir que desde la primera hora de mezclado a las 24 horas de mezclado la resistencia al corte no drenado incrementa de 170% a 600%, siendo mucho más importante este incremento a contenido mayores de cemento. Asimismo, pasadas las 24 horas de la mezcla se alcanza aproximadamente del 60% al 90% de la resistencia total a los 7 días.
- A las mezclas con 6% de cemento en volumen y un tiempo de fraguado entre 3 a 7 días no permite ejecutar el ensayo de veleta de corte, debido a la dureza alcanzada del material.

4.2.4.5. Esfuerzo de corte calculado a partir del ensayo de compresión simple no confinada (UCS)

El análisis de compresión simple se realizó de acuerdo con la norma ASTM D2166, en las muestras moldeadas como se indica anteriormente. Según la ASTM D2166 se puede especificar que la resistencia al corte (S_u) es equivalente a la mitad del valor obtenido a la compresión simple (q_u), por ello como equivalente a esta relación se trazó como valor mínimo de compresión 100kPa. En la muestran los resultados obtenidos. La Figura 6 ha sido limitada a una duración relativamente mayor a 1 día, esto con la finalidad de comparar mejor visualmente el incremento de resistencia al corte en etapas tempranas del curado.

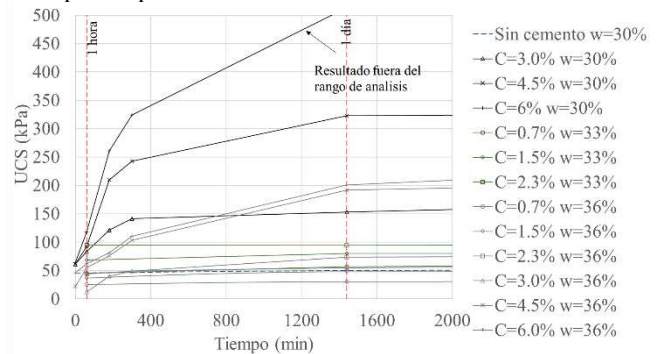


Figura 6. Gráfico de comparación esfuerzo de corte en el tiempo
 Notas: w: Contenido de humedad; C: contenido de cemento en volumen.

De la se interpreta lo siguiente:

- Para los ensayos de resistencia a la compresión simple el material sin cemento adicionado se puede observar que su resistencia incrementa en el tiempo, sin embargo, los valores no alcanzan los valores de compresión mínimos recomendados ($q_u > 100kPa$).
- Para las mezclas al 30% de contenido de humedad natural los resultados al 3% de cemento muestran una resistencia mayor que el material sin cemento. Con la finalidad de cumplir el valor mínimo recomendado de 100 kPa, para un contenido de humedad de 30% lo mínimo que se debería recomendar sería la adición de 3% de cemento en volumen de mezcla (valor mínimo ensayado), debido a que, los resultados visualizan valores encima de 100 kPa pasada una hora después de efectuada la mezcla.
- Para las mezclas al 33% de contenido de humedad natural ninguna mezcla muestra resultados favorables al corto plazo, únicamente a los 7 días la mezcla de 2.3% en

volumen sobrepasa el valor de los 100 kPa recomendados. Por ello, se debe tener en consideración valores mayores de contenido de cemento para las mezclas.

- Para las mezclas con 36% de humedad natural los resultados muestran una clara tendencia al incremento de su compresión simple en el tiempo. Se puede observar que la mezcla al 1.5% de cemento tiene valores similares y la misma tendencia de incremento de resistencia que el material natural, aun teniendo 6% más de contenido de humedad natural. Con la finalidad de cumplir el valor mínimo estimado de 100 kPa, para un contenido de humedad de 36% lo mínimo que se recomienda es la adición de 4.5% de cemento en volumen de mezcla, debido a que los resultados visualizan valores encima de 100 kPa pasada tres horas después de efectuada la mezcla.
- Todos los ensayos presentan un incremento de la resistencia independientemente de la cantidad del cemento. Se puede inferir que desde la primera hora de mezclado a las 24 horas de mezclado la resistencia al corte no drenado incrementa de 100% a 800%, siendo mucho más importante este incremento a contenido mayores de cemento. Asimismo, pasadas las 24 horas de la mezcla se alcanza aproximadamente del 71 al 95% de la compresión simple total estimada a los 7 días.
- De la gráfica se puede notar que las muestras con menor contenido de humedad desarrollan compresiones simples mucho mayores a menores cantidades de cemento que muestras con mayor contenido de humedad, las cuales necesitan cantidades altas de cemento para alcanzar un performance adecuado.

4.2.4.6. Relación deformación unitaria y esfuerzo de compresión.

Para el siguiente análisis se toma las normas ASTM D2166 (ASTM, 2016b), en cual se presenta envoltentes de las diferentes mezclas con respecto al porcentaje de cemento agregado en volumen. Para esta evaluación se utilizaron los datos de deformación unitaria con respecto al día 7, siendo evaluado a este tiempo de fraguado por no presentar mayores cambios hacia el día 28.

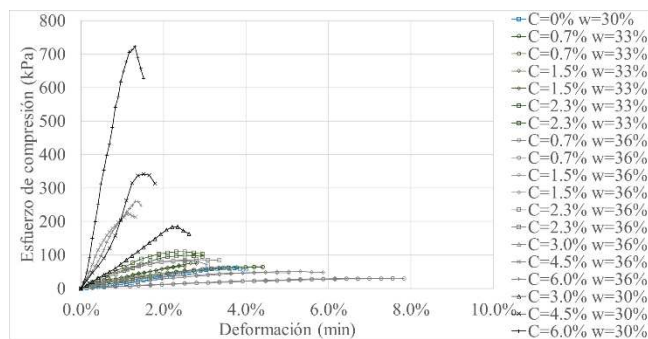


Figura 7. Gráfico de comparación compresión simple vs deformación en el tiempo.

Notas: w: Contenido de humedad; C: contenido de cemento en volumen.

Los valores de deformación obtenidos para los diferentes volúmenes de mezcla muestran que a mayor contenido de cemento el material aumenta considerablemente su resistencia a la

compresión simple y presenta una tendencia de incremento en su rigidez, por consiguiente, adopta características de un material frágil. Es pertinente destacar que según (Yu et al 1997) el modo de falla de una muestra de mezcla de suelo y cemento es diferente al obtenido por un ensayo de compresión simple no confinada, por esta razón, no se puede afirmar que el material con mayor contenido de cemento será más frágil. Asimismo, para entender mejor el comportamiento de la mezcla saprolito-cemento, se tomaron muestras inalteradas del núcleo para realizar ensayos triaxiales (ver Sección 6.2.2).

5. EVALUACIÓN DEL MATERIAL SUELO – CEMENTO EN EL SITIO

En esta sección se describen los resultados de los ensayos de campo y de laboratorio de muestras obtenidas durante la ejecución del núcleo de baja permeabilidad. Durante la ejecución del Dique de Arranque y del Recrecimiento N°1 y N°2 se utilizó un rango de cemento en la mezcla de 3% a 5% en volumen.

Durante el año 2019, se utilizó como áreas de préstamo el Borrow 4 entre enero y septiembre y del Borrow 2 entre septiembre y diciembre. Luego, en el año 2020, se utilizó el Borrow 2 y Borrow 5 en diciembre. Finalmente, en el 2021 se utilizó el Borrow 2 de febrero a septiembre.

5.1 Áreas de préstamo

5.1.1 Área de Préstamo - Borrow 2

Se encuentra cerca del estribo oeste de la presa y dentro del embalse. El contenido medio de humedad fue del 32.3%, que es un 2,6% (en promedio) más seco que el saprolito procedente del Borrow 4 y un 9.7% (en promedio) más alto que el promedio del OCH Standard Proctor (del relleno del Dique de Arranque). El saprolito procedente del Borrow 2 era adecuado para la construcción del núcleo.

5.1.2 Área de Préstamo – Borrow 4

El préstamo Borrow 4 se encuentra dentro del embalse, directamente aguas arriba del talud de la presa. El saprolito del préstamo era adecuado para la construcción del núcleo a pesar de su contenido de humedad relativamente alto, compensado por los resultados de resistencia al corte obtenidas por el uso de cemento.

5.1.3 Área de Préstamo – Borrow 5

El Borrow 5 se encuentra cerca del estribo este de la presa y dentro del embalse. El contenido medio de humedad fue del 30.21%, que es un 4.16% (en promedio) más seco que el saprolito procedente del Borrow 4 y un 7.2% (en promedio) más alto que el promedio del OCH Standard Proctor (del relleno del Dique de Arranque).

5.2 Propiedades índice y de resistencia del material

5.2.1 Ensayos índice

La Tabla 2. Resumen de ensayos de laboratorio y campo del material colocado indica los resultados de las propiedades índice del material colocado durante todas las etapas de construcción del núcleo de baja permeabilidad.

Tabla 2. Resumen de ensayos de laboratorio y campo del material colocado

Ensayo		Promedio	Mínimo	Máximo
Contenido de Humedad (%)		32.5	25.5	45.4
Gravedad Especifica		2.64	2.47	2.75
Granulometría	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
Límites de Atterberg	Limite Plástico (%)	30.3	19	42.3
	Limite Líquido (%)	39.3	28.5	53.6
	Índice de Plasticidad	9	2	23
Densidad in situ	Densidad seca in situ (kg/m ³)	1,406	1,159	1,837
	Contenido de humedad in situ (%)	32.5	25.5	45.4
	Compactación relativa (%)	100	94	105
Resistencia no drenada	Pico (kPa)	72	38	200
	Remoldeado (kPa)	40	10	120
	Sensibilidad	1.9	1.4	4.0
Infiltración	Tasa de infiltración (m/s)	<1 x 10 ⁻⁷ cm/s	-	-

Durante el Dique de arranque se colocaron 181,361m³, para el Recrecimiento N°1 se colocó 41,870m³ y finalmente para el Recrecimiento N°2 se colocó 16,200m³. Las propiedades de índice de saprolito colocadas durante la construcción se resumen:

- El saprolito es relativamente homogéneo y generalmente se describe como limo de baja plasticidad con contenido variable de arena. El material de relleno fue extraído del área de préstamo con un contenido de humedad natural en el rango de 25% a 45%, con un promedio de 33%, es decir 10% por encima del OCH.
- Los rangos de límite líquido (LL) y límite plástico (LP) estuvieron entre 29% a 54% y 19% a 42%, respectivamente, donde el promedio de LL fue de 39% y de LP de 30%. El índice de plasticidad promedio fue 10%.

Los resultados se grafican en la Carta de Plasticidad de la Figura 8.

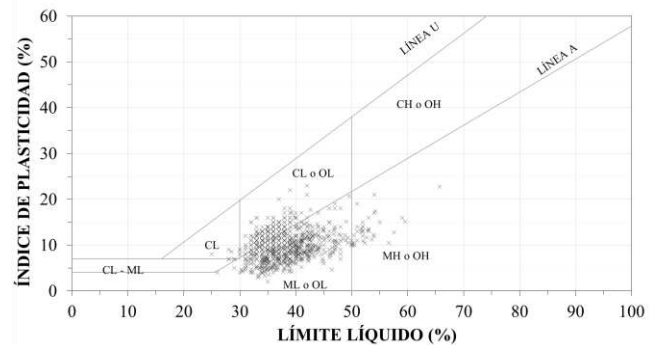


Figura 8. Carta de plasticidad del saprolito

- Los contenidos máximos y mínimos de finos estuvieron entre 34% a 96%, respectivamente, con un promedio de 64% todas las muestras pasaron el tamiz estándar 1/2". El contenido de arena varió de 1% a 36%. La gravedad específica del saprolito fue generalmente 2.64.
- El promedio de resistencia al corte no drenado en el campo fue de 72 kPa. El valor residual de la resistencia al corte fue de 40 kPa. La sensibilidad del relleno (relación entre la resistencia máxima y la residual) osciló entre 1.0 y 4.0, con un valor medio de 1.9. De acuerdo con los resultados de la veleta de corte la Zona 1 presenta una ligera a moderada sensibilidad.
- La densidad in situ del relleno de Zona 1 se comprobó mediante métodos de prueba de densidad de cono de arena, densímetro nuclear y globo de goma durante el Dique de Arranque; sin embargo, en el Recrecimiento N°1 y N°2 se utilizó con mayor frecuencia el ensayo de globo de goma. Todos los resultados se compararon con la densidad seca Proctor estándar de un punto. El 83% de los ensayos de densidad sobre el terreno cumplieron el 100% de la máxima densidad del Proctor Estándar de un punto. El relleno de densidad menor al 100% fue aprobado en base a $S_u \geq 50$ kPa, esfuerzo de compactación observado y texturas de relleno aceptables. En general, se observó una textura densa, homogénea y bien tejida en las perforaciones de los conos de arena, en los pozos de prueba y en las zanjas de anclaje de las geomembranas. Los rellenos que se presentaron como blandos o sobre saturados fueron rechazados. En general, la densidad media de campo alcanzada fue del 100% del Proctor Estándar de un punto, cumpliendo los requisitos especificados. El peso unitario húmedo de la Zona 1 con cemento osciló entre 14,3 kN/m³ y 26,2 kN/m³ (media de 18,2 kN/m³).
- Las pruebas de infiltración de campo (ASTM D3385) completadas en Zona 1 no tuvieron éxito debido a las bajas tasas de infiltración. No se observaron cambios en el nivel de agua durante la duración de la prueba (24 horas). Pese a ello, los resultados de las pruebas fueron menores a 1x10⁻⁷ cm/s.
- La difracción de rayos X en la fracción menor de <2μm indicó que los minerales de saprolito están predominadas por la Caolinita (64%) con porción menor de Illita (36%),

colocación en el área de trabajo. En general, la Zona 1 logró un relleno bien tejido y hermético, con poca o ninguna presencia de relleno mal mezclado, lentes de cemento, grumos de cemento o vacíos.



Imagen 2. Colocación y compactación del sapolito sin cemento en la zanja de corte. Nota: El material es protegido con plástico para evitar su saturación. Foto tomada en diciembre, 2018.



Imagen 3. Colocación y compactación del sapolito con cemento mezclado en el área de préstamo colocado en la zanja de corte. Foto tomada en enero, 2019.

6.1.1.2. *Uso del cemento y observaciones de campo*

El cemento Portland fue seleccionado como aditivo para mejorar la trabajabilidad del sapolito con la finalidad de reducir el contenido de humedad natural y reducir la susceptibilidad al agua. El porcentaje de cemento agregado varió de 1% a 6% en volumen dependiendo del contenido de humedad de relleno in situ en el préstamo. En promedio se utilizó 4.5% de cemento. El contenido de sapolito y cemento se controlaron estrictamente por volumen, mediante el conteo del número de cargas de la cuchara de una excavadora (es decir, 1 cucharada de cemento por cada 29 cucharadas de sapolito para 3.5% de cemento en volumen).

Inicialmente, se empleó el Método 1-Mezclado in situ (Ver sección 6.2.1). De este proceso de mezclado se observó una mezcla adecuada con muy poca o ninguna concentración de cemento. Sin embargo, dicho procedimiento se consideró lento e ineficiente. Como resultado, se reemplazó por el Método 2-Mezclado antes de colocarlo (Ver sección 6.2.2). Esta metodología de mezcla mejoró la eficiencia de construcción, según los indicadores clave de rendimiento del constructor, y redujo el tiempo de mezcla en más de la mitad. También, se observó una mezcla adecuada con muy pocos o nulos grupos de cemento dando un producto homogéneo.

Los valores de resistencia al corte (S_u) aumentaron significativamente después de la introducción del cemento como aditivo. El promedio de S_u en campo antes de los usos del cemento

fue de 40 kPa, un valor inferior a lo estipulado en las especificaciones técnicas. Por otro lado, el S_u promedio después de los usos del cemento fue de 74kPa (incremento del 85%), lo que pudo reflejarse en la mejora de la trabajabilidad del relleno. Incluso, se observó que el relleno era menos susceptible a la precipitación y la filtración, lo que condujo a una disminución significativa en el retrabajo y la eliminación de capas; sin embargo, no se recomienda trabajar en condiciones de lluvia continua.

Durante la realización de los trabajos, se ejecutaron calicatas de exploración en varias ocasiones para verificar la textura del relleno y para asegurarse de que no haya lentes de relleno y cemento mal mezclados, grumos de cemento o huecos. En general, se pudo comprobar el incremento de la resistencia en el tiempo, así como se observó una textura de relleno bien hermética y de baja permeabilidad, tal como se evidencia en la Imagen 4.



Imagen 4. Ensayos de resistencia simple dentro de calicatas en el núcleo. Fotos tomadas en el Dique de Arranque

Las características del índice de sapolito fueron muy consistentes a lo largo de la construcción con un contenido de humedad generalmente más húmedo que el contenido de humedad óptimo (OCH), lo que puede conducir a una mala trabajabilidad, una mala compactación y una densidad baja. Este efecto se acentúa durante las precipitaciones. Por lo tanto, de forma similar al relleno de la zanja de anclaje, se recomendó la adición de cemento (3% a 6% en volumen) al sapolito.

La trabajabilidad del material mejoró significativamente debido a la hidratación del cemento, lo que condujo a una mejora en los resultados de resistencia en el campo y en la eficiencia en el avance de la construcción. Sin embargo, durante la construcción, hubo dos ocasiones en las que se observó agrietamiento debido a la colocación de un sapolito más rígido y seco sobre sapolito más débil y saturado (ver Imagen 5). Por lo que se precedió a retirar y sustituir estas áreas por material de relleno más seco y adecuado.



Imagen 5. El sapolito colocado encima del sapolito más húmedo. Nota: Se evidenció signos de agrietamiento (10 m x 3 m de tamaño). El relleno fue retirado posteriormente.

La superficie compactada por las orugas de la topadora y la excavadora daba lugar a superficies irregulares que permitían el estancamiento de agua de las precipitaciones, lo que a veces provocaba la saturación del relleno. Esto a menudo requería la eliminación de hasta 0.15 m de relleno saturado antes de continuar con la colocación de la Zona 1.



Imagen 6. Textura del sapolito con cemento antes de la colocación de geomembrana. Nota: La textura del relleno parece ser de baja permeabilidad.



Imagen 7. Textura del sapolito con cemento dentro de un ensayo de cono de arena. Nota: El agua de la foto se debe a precipitaciones. La textura del relleno parece ser de baja permeabilidad. Foto tomada en junio 2019.

6.2 Mezclado de suelo/cemento en campo

Esta sección documenta los métodos de campo utilizados para mezclar y colocar la mezcla. A partir de enero de 2019, se adoptó una mezcla de sapolito con cemento para aumentar la resistencia al corte no drenado del material de relleno. El material mezclado tenía una mejor trabajabilidad, mostraba mejores resistencias iniciales y un lento aumento de la resistencia con el tiempo, además de tener una mejor resistencia a la erosión. Se adoptó el uso de sapolito mezclado con cemento para la colocación de la zanja de corte y del núcleo de baja permeabilidad de sapolito inclinado.

A continuación, se describen los dos principales procesos de mezcla:

6.2.1 Método 1 – Mezclado in situ

Este método se utilizó durante las dos o tres semanas iniciales de colocación de la mezcla de sapolito de cemento, luego se suspendió al adoptarse el Método 2.

- El material de sapolito procedente del área de préstamo fue excavado y transportado hasta el nivel de trabajo.

- A continuación, el sapolito se extendió en una elevación de entre 200 y 300 mm, ya sea con un tractor o con una excavadora.
- La excavadora hizo surcos en el sapolito de 150 a 250 mm de profundidad utilizando la cuchara para generar un patrón de rayas cruzadas.
- Después, se espació el cemento sobre el sapolito surcado y se mezcló mediante nuevos cortes transversales.
- Los grumos grandes de cemento se rompían manualmente y el material mezclado se compactaba con 4 a 6 pasadas del tractor.
- Se comprobó que este método requería más mano de obra y podía dar lugar a áreas de material mal mezclado que requerían observaciones diligentes de cada levantamiento para garantizar que los grumos de cemento se rompan y se vuelva a mezclar.

6.2.2 Método 2 – Mezclado antes de colocarlo

Se desarrolló un proceso de mezclado alternativo para permitir la mezcla de los materiales más cerca de la zona de préstamo y el posterior transporte del relleno mezclado a la zona de trabajo. La secuencia de trabajos para este procedimiento se describe a continuación:

- El material de sapolito se excava del talud de las áreas de préstamo utilizando una excavadora y se apila en un área cercana designada.
- Se acumula aproximadamente dos cargas de camión de sapolito a la vez.
- Se añade cemento al stock de sapolito para su mezclado con excavadora. La cantidad de cemento en volumen mezclado con el sapolito se estimó en base al número de cargas de la cuchara de la excavadora. Suponiendo que la densidad aparente (bulk density) del sapolito y el cemento sea de 990 kg/m³ y 986 kg/m³, respectivamente, en peso seco se estimaría una estimación de 1.5% a más.
- El material mezclado se transportó al nivel de trabajo y se colocó en elevaciones de 300 mm.
- El proceso completo dura aproximadamente de 30 a 45 minutos. Era importante que el material se colocara en el plazo de una hora, ya que el cemento comenzaba a hidratarse al iniciarse la mezcla. El transporte del material se llevó a cabo principalmente en camiones volquetes con capacidad para transportar de 12 a 23 m³ de material de relleno.

6.3 Metodología alternativa de compactación

De los hallazgos encontrados y la experiencia de estas campañas de construcción, se puede recomendar el siguiente procedimiento técnico para la evaluación del control de compactación en campo de suelos residuales estabilizados con cemento.

6.3.1 Control de compactación

Las pruebas de compactación con Proctor Standard indicaron que la máxima densidad seca (MDS) oscilaba entre 1,330 kg/m³ y 1,712 kg/m³, con un valor promedio de 1,527 kg/m³ y los valores de Óptimo Contenido de Humedad (OCH) variaban entre 15% y 32%, con un promedio de 23%. Esto se debe a que el OCH es mayor que el contenido de humedad natural (en 10% en promedio), por lo que se procedió a utilizar el Proctor Standard aplicado en un Solo Punto, es decir, se estimó la máxima densidad seca al

contenido de humedad natural bajo la misma energía compactación del procedimiento. Los valores de máxima densidad seca del Proctor Standard en un punto variaron entre 1,225 kg/m³ y 1,570 kg/m³, con un valor promedio de 1,414 kg/m³ y a un contenido de humedad natural comprendiente entre 24.6% y 42.8%.

De acuerdo con la evaluación presentada anteriormente, la añadidura de cemento no provocaría disminuir el contenido natural hasta el OCH del Proctor Estandar. Por ello, se procedió a conformar un área de aprobación del material en la cual estén inmersos los parámetros de resistencia al corte y permeabilidad.

La Figura 10 muestra una comparación, desde la construcción del Dique de arranque hasta el Recrecimiento N°2 del OCH y la máxima densidad seca obtenida por el Proctor Estándar de 5 puntos versus su comparación de la máxima densidad seca obtenida por Proctor Estándar de 1 Punto al contenido de humedad natural.

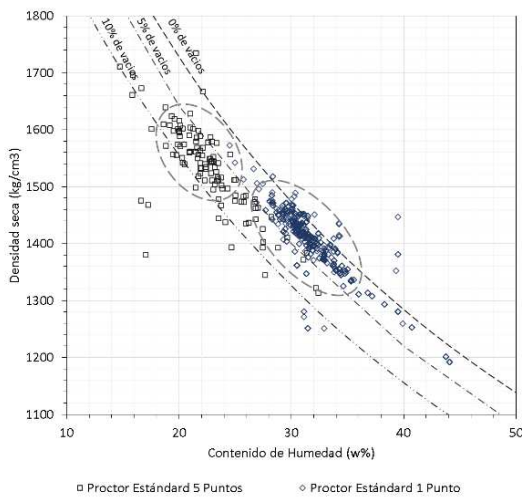


Figura 10. Comparación de densidad obtenida por el Proctor Estándar de 5 puntos vs Proctor Estándar de 1 Punto.

Con los resultados de permeabilidad realizados en la Zona 1 colocada durante la Construcción 2019, se preparó con el mismo enfoque que el anterior, la Figura 11 que muestra el contenido de humedad y la densidad seca de los resultados que cumple con las especificaciones (menores a 1x10⁻⁷cm/s). Todos los puntos mostrados, los cuales representan la construcción desde el Dique de arranque al Recrecimiento N°2, están dentro de las especificaciones en lo que respecta a la permeabilidad, sin embargo, los límites trazados, comprendidos entre una densidad seca entre 1250kg/cm³ y 1500kg/cm³ y un contenido de humedad entre 25% a 37%, representan la zona principal donde se concentran la mayoría de los puntos.

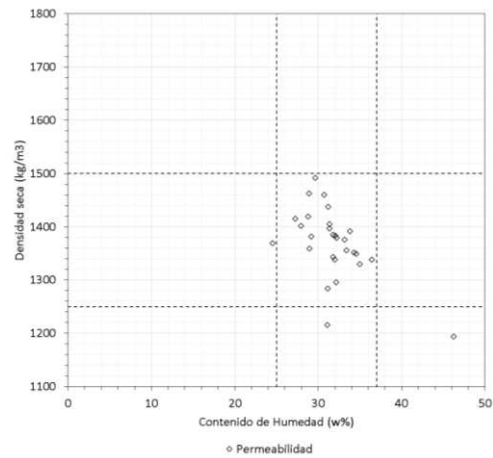


Figura 11. Resultados de densidad seca y humedad de los ensayos permeabilidad menores de 1x10⁻⁷cm/s.

De la misma manera con los resultados de resistencia al corte mediante la veleta de corte se grafica en la Figura 12, la densidad seca y el contenido de humedad (obtenido por el método del cono de arena) de las áreas donde los resultados han mostrado valores iguales o mayores a 50Pa.

En vista de los resultados anteriores, se trazaron los límites de estos resultados comprendidos entre una densidad seca entre 1250kg/cm³ y 1500kg/cm³ y un contenido de humedad entre 25% a 37%.

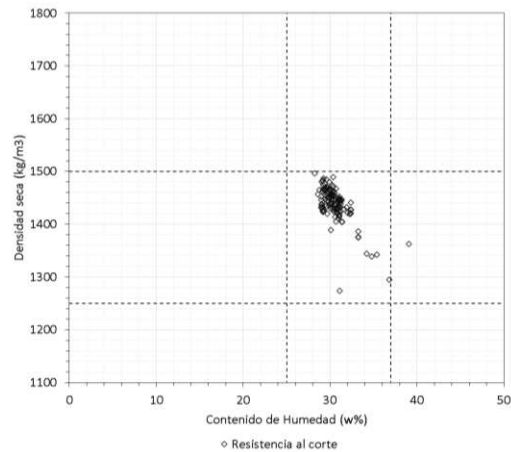


Figura 12. Resultados de densidad seca y humedad de los ensayos veleta de corte mayores a 50kPa.

Luego de ello, se formuló el rango comprendido entre un porcentaje de vacíos aceptable (definido en 5% de vacíos), con lo cual se representa un esfuerzo de compactación mínimo para un adecuado trabajo como barrera de baja permeabilidad, interceptado con los rangos de densidad in situ y contenido de humedad definidos por resistencia al corte y permeabilidad. En la Figura 13 se presenta el control de compactación empleando una especificación alternativa (área en azul) con los resultados de los Proctor Estandar a 1 punto.

Figura 14 se presentan los resultados obtenidos de la densidad in situ comprendidos dentro del área de aprobación (área en azul), los resultados fuera de esta área marcada son puntos aislados donde la estimación de gravedad específica no pudo enmarcarlos.

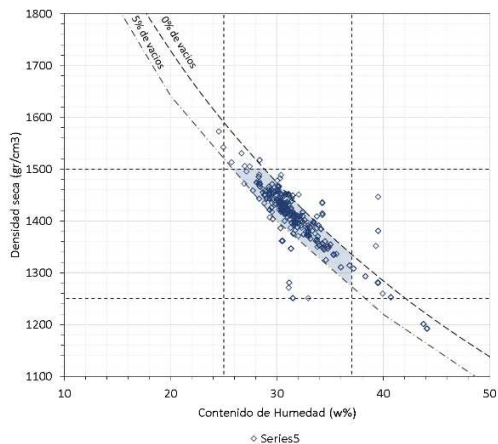


Figura 13. Rango de control de compactación empleando parámetros de especificación alternativos.

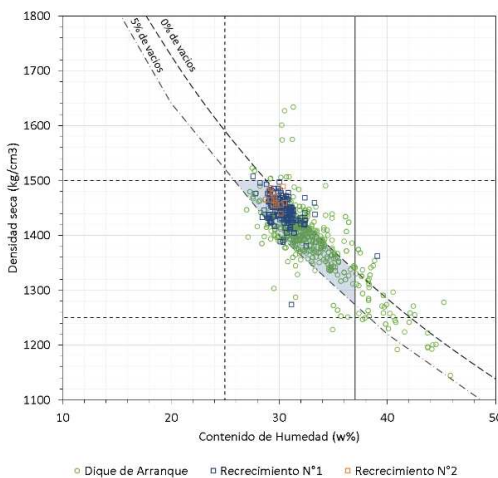


Figura 14. Comparación de densidad obtenida por el Proctor Estándar de 1 Punto vs Densidad de campo

7. ESTIMACIÓN DE COSTOS

El mayor inconveniente de una solución de cemento como material estabilizante está ligados al incremento del costo unitario de la colocación del material. En este proyecto, la implementación de esta solución significó un gran incremento presupuestal del costo unitario a razón de >650% a más de presupuesto.

El problema del cemento inicia desde su acarreo, debido a que el punto de distribución más próximo al proyecto se ubica a una distancia aproximada de 201km. Es por lo que el metro cúbico (m³) de cemento puesto en obra alcanzó a costar 324US\$.

De esta manera, el costo unitario de la colocación y conformado del material (incluyendo corte en el área del préstamo y cargaño)

pasó de costar 3.10US\$/m³ a 20.25US\$/m³, estimado con un 5% de cemento en volumen de mezcla.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Según los ensayos de laboratorio de la mezcla se concluye que:

- Las mezclas de saprolito con menos del 2.3% de cemento en volumen no alcanza el esfuerzo de corte requerido de 50kPa en la primera hora de mezclado.
- Los valores de 3% a 6% de contenido en volumen de cemento son los recomendables para mezclar con saprolito, siendo el valor de 4.5% un valor medio a utilizar.

Según el trabajo de campo y la construcción del núcleo de baja permeabilidad se concluye que:

- Las mezclas de saprolito con al menos 4.5% de cemento en volumen dieron los mejores resultados en campo, siendo un material con una textura de baja permeabilidad, fácil de trabajar y con adecuada resistencia al corte inicial.
- Debido a la baja proporción de cemento utilizado el cemento prácticamente no tiene impacto en el núcleo en términos de fragilidad y disipación de la presión de poro, y el núcleo cumplió con la intención de diseño.
- El equipo de compactación, tractor de oruga, excavadora y planchas compactadoras, deben proporcionar una compactación adecuada de manera rápida.
- Debe establecerse un plan de manejo de aguas superficiales para garantizar que se minimice la exposición del relleno a la precipitación.
- Evaluar y estimar un máximo de precipitación para detener de la colocación del relleno. Esto debe desarrollarse de acuerdo con los equipos meteorológicos de cada sitio, así como, de la experiencia previa del lugar.
- En etapas iniciales del proyecto y áreas donde se enfrenta posibles filtraciones por la fundación, pueden ser necesarios ensayos de control de calidad y aseguramiento más estrictos pueden ser necesarios para evaluar el performance del relleno.

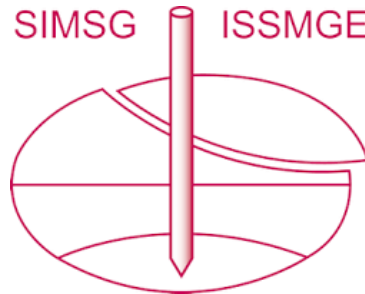
Las principales recomendaciones del proyecto son:

- Sellar con el equipo disponible la capa lo más rápido posible cuando comience a llover para minimizar la penetración de agua y el volumen de relleno saturado que debe removerse.
- Nivelar el relleno con la finalidad de promover la escorrentía. Sin embargo, es importante considerar que pendientes abruptas causarían una erosión superficial del relleno.
- La precipitación es un factor específico del sitio y debe ser considerado al diseñar el relleno de saprolito como un núcleo de presa.
- La decisión de proceder con la mezcla de cemento y saprolito depende de varias condiciones específicas del sitio como climáticas (precipitación), el equipo disponible y el cronograma del proyecto. La baja precipitación puede hacer posible la colocación del relleno de saprolito sin el uso de cemento.
- Aumento de las pruebas de control de calidad y monitoreo del relleno para gestionar el riesgo de tener un relleno saturado, blando y susceptible a asentamientos. Finalmente, la realización de ensayos de mayor envergadura como SCPTu a través del relleno

9. REFERENCIAS

- Blight, G. E. (1997). *Mechanics of Residual Soils: A Guide to the Formation, Classification and Geotechnical Properties of Residual Soils, with Advice for Geotechnical Design.*
- Burton, B. (1998). *Earthworks with Wet, Fine Grained Tropical Residual Soils.*
- International Committee of Large Dams (ICOLD). (2009). *Tropical Residual Soils as Dam Foundation and Fill Material.*
- Sariosseir, F. y Muhunthan, B. (2009). *Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington State Soils.*
- Suarez, J. (2009). *Deslizamientos. Análisis Geotécnico; Capítulo 10: Suelos Residuales.*
- Wesley, L. D. (2010). *Geotechnical Engineering in Residual Soils.*
- Yu, Y., Pu, J. y Ugai, K. (1997). *Study of mechanical properties of soil-cement mixture for a cutoff wall.*

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.