

Evaluación geotécnica del uso de material de banco para la construcción del recrecimiento en un depósito de jales

Geotechnical evaluation of using borrow material for the construction of buttress in a tailing storage facility

González S. (Knight Piesold México), **Lucero R.** (Knight Piesold México), **Suárez B.** (Knight Piesold México),
Liaudat M. (Knight Piesold México), **Rodríguez H.** (Knight Piesold México).

RESUMEN: En este artículo se presenta la factibilidad, evaluación y configuración de un material meteorizado proveniente de banco, para el uso de los recrecimientos de los bordos en un depósito de jales. El principal objetivo de este estudio mediante pruebas de campo parte de la evaluación geotécnica mediante el uso de terraplenes de prueba con la finalidad de establecer un comportamiento mecánico del relleno de los bordos de manera práctica y asequible. En este documento se describen los requerimientos geotécnicos de los materiales utilizados (lutita altamente meteorizada), equipos mecánicos para extracción, conformación y procedimientos de compactación de los terraplenes, con la finalidad de determinar las características óptimas de: 1) espesor de capa de construcción, 2) contenido de agua, 3) número de pasadas y 4) densidad objetivo para los controles posteriores en obra. Al definir estas variables, se logra determinar el óptimo comportamiento mecánico del terraplén del depósito de jales construido, representando las características consideradas en las evaluaciones de estabilidad de la estructura. Asimismo, se logra evitar problemas de erosión interna y erosión superficial. Los materiales presentados en este estudio constituyen una solución para una necesidad específica, es decir, se debe buscar que los materiales sean compatibles con la disposición del terreno para las demandas de cada proyecto.

ABSTRACT: This article presents the feasibility, evaluation, and configuration of a weathered-borrow material, for the use of fill embankments in a tailing storage facility. The main objective of this field study based on geotechnical evaluations using test cells to establish a practical and reasonable mechanical behavior. This document describes the geotechnical requirements of the materials used (highly weathered shale), mechanical equipment for extraction, regrading, and compaction procedures for the embankments, to determine optimal characteristics of 1) layer thickness during construction of the embankment, 2) water content, 3) number of passes for compaction and 4) target density for subsequent on-site controls. With the definition of these variables, we can determine the optimal strength of the embankment, representing the characteristics considered in the stability analysis of the structure. In addition, we avoid problems associated with internal erosion and surficial erosion. The materials presented in this study constitute a solution for a specific need, that must be sought that the materials are compatible with the layout of the land for the demands of each project.

1 INTRODUCCIÓN

El problema de la compactación de los suelos estuvo desde un principio ligado a la necesidad de controlar los trabajos de campo. La verificación de estos trabajos no sólo se refiere a que la construcción respete los diseños establecidos, sino también a que se alcancen en la obra los resultados técnicos exigidos por el diseñador del proyecto.

Para medir la resistencia, la compresibilidad, la permeabilidad y todas las demás propiedades relevantes de los suelos se requieren pruebas especializadas, que necesitan laboratorios con un cierto nivel de equipamiento y tiempos de ejecución casi siempre demasiado largos para controlar un proceso de compactación.

Esta situación conllevó buscar alguna característica del suelo compactado que representará la compactación obtenida con suficiente confiabilidad para servir de elemento de control y que a su vez, pudiera conocerse con gran prontitud partiendo de la idea intuitiva de que la compactación disminuye el volumen de los suelos, tanto más, cuanto más se compacten.

En obra se realizan ensayos para elegir cuál de los métodos de compactación resulta satisfactorio en cuanto a comportamiento. Naturalmente, es correcta la afirmación de que un método de compactación logra un cierto peso volumétrico. Adicionalmente, se puede llegar a establecer

un peso volumétrico mientras se construye una obra térrea, para garantizar la funcionalidad del proyecto, sustentando las hipótesis iniciales con ensayos de campo y laboratorio. Si se acepta, en un estudio para proyecto, se ha seleccionado un suelo compactado con los criterios actuales, de manera que se garanticen las propiedades fundamentales adecuadas (presentadas como objetivos de la compactación) y se acepta también, que ese suelo queda tipificado por su peso volumétrico seco, de manera que al llegar al valor del peso volumétrico en el campo se tiene el suelo deseado, con las propiedades consideradas previamente, aceptando como válida la Hipótesis: Los suelos compactados hasta el mismo peso volumétrico seco con diferentes métodos de compactación adquieren las mismas propiedades (Rico & Castillo, 1992).

1.1 Antecedentes

Los terraplenes de prueba se utilizan para evaluar la utilización y explotación de un banco para la conformación de: 1) vías terrestres y/o plataformas de trabajo; 2) cortinas para presas de tierra y 3) bordos de depósitos de jales. La construcción de los terraplenes de prueba se consideran obras de movimiento de tierra que se realizan como parte de la investigación geotécnica del suelo como material de construcción, con la finalidad de conocer los parámetros de compactación más eficientes de acuerdo con las características de un compactador determinado y las

condiciones de trabajo. Algunos de los aspectos que se pueden determinar con los terraplenes de prueba son: 1) el mejor método de excavación y colocación de los materiales; 2) la influencia de la cantidad de agua aplicada al material en su colocación y compactación sobre su peso volumétrico; 3) el proceso de compactación, incluyendo los equipos a utilizar, el número de pasadas y el espesor de las capas de material; 4) la segregación de los materiales; y 5) las propiedades de resistencia y deformabilidad de los materiales in situ en comparación con las obtenidas en laboratorio.

Cabe destacar que se realiza un control establecido de estos materiales en cuanto la humedad y naturaleza del suelo (porcentaje de tamaño de partículas gruesas, erodabilidad, plasticidad de las partículas finas, densidad específica, entre otros).

1.2 Estado del arte

Existen diversos estudios que involucran la evaluación de materiales térreos para la conformación de terraplenes de prueba con el fin de establecer el diseño óptimo de alguna obra civil. Auvinet y Sanchez (2020), utilizaron materiales uniformes (escoria volcánica o tezontle) para la evaluación de construcción de terraplenes ligeros; con la finalidad de controlar asentamientos sobre suelos lacustres de muy alta compresibilidad (arcilla del Valle de México). En este estudio los autores compararon el uso de materiales provenientes de diferentes bancos para establecer la mínima densidad de los materiales colocados en capa. Determinaron que el tezontle resulta ser más ligero cuando se encuentra con una granulometría uniforme, además del menor desplazamiento relativo entre partículas; con la finalidad de producir la menor magnitud de asentamientos sobre el suelo altamente compresible. La alta porosidad del tezontle disponible para la construcción de plataformas de trabajo ligeras sobre suelos altamente compresibles constituye una solución para una necesidad específica, es decir, se debe buscar que los materiales sean compatibles con la disposición del terreno para las demandas de cada proyecto.

Por otro lado, los desplazamientos exteriores e interiores de una presa se pueden medir. Esto permite calibrar los análisis de elemento finito con mediciones durante la construcción de la estructura o en un terraplén de prueba. Así se pueden determinar valores más precisos de los parámetros que definen el comportamiento de los materiales que constituyen el terraplén. En consecuencia, se puede tener una mejor aproximación del estado de esfuerzos real en la estructura.

2 PROCESO CONSTRUCTIVO Y MONITOREO

Es recomendable que antes de iniciar los acarreo el material sea humectado y una vez que el material es colocado en el sitio del terraplén de prueba, se extiende mediante motoconformadora o bulldozer, el cual se define dependiendo de la disgregación del material. Posteriormente, el material es extendido hasta alcanzar un espesor uniforme y, por último, se procede a compactar,

este último rubro el equipo a ser utilizado también se define dependiendo de la constitución del material.

La manera de controlar los desplazamientos verticales cuando se compactan los materiales colocados en el terraplén de prueba es mediante observación de los asentamientos ocurridos a través de placas metálicas. Para asegurar que dichas mediciones son realmente representativas del comportamiento del material, es importante que los terraplenes tengan una superficie adecuada que permita realizar un gran número de lecturas topográficas.

Bertram (1973) recomienda que las dimensiones mínimas de un terraplén de prueba rectangular sean 9×18 m. Generalmente se prueban distintos espesores de capa para seguir la evolución de los asentamientos correspondientes. Posteriormente, se ubican los puntos de medición formando una malla. Se llevan a cabo nivelaciones de los puntos de medición antes de la compactación y después de un cierto número de pasadas del equipo; los resultados se trazan los perfiles de asentamiento.

Una vez definidos los materiales a utilizar en cantera, el equipo de tendido y compactación, espesor de la capa y el número de pasadas, se realizan muestreos mediante calas volumétricas para determinar la densidad de la capa colocada; también es posible medir la permeabilidad a través del descenso capilar con pozos circulares mediante el método de Porchet. Con este muestreo se deben de realizar granulometrías, para conocer la rotura del material y producción de partículas finas.

La producción de partículas finas es un parámetro que está en función de la manipulación y corte en cantera, así como el tendido y compactación en la capa ya colocada.

Es deseable examinar la apariencia de cada capa, después de la compactación, ya que con esto se define la necesidad de ejecutar el escarificado superficial. Al final de la construcción del terraplén se pueden excavar cortes y trincheras para examinar secciones donde se observe la uniformidad de la compactación, la segregación de partículas y la liga entre capas sucesivas. Es importante definir la composición granulométrica de los materiales del terraplén, determinando la distribución y el tamaño máximo de granos. Estos parámetros son fundamentales para tomar en cuenta el efecto de escala, ya que el comportamiento mecánico de los enrocamientos varía en función del peso volumétrico seco y el tamaño máximo de granos. Dado el tamaño máximo de granos, la resistencia al corte y el módulo de deformación se incrementan con el aumento del peso volumétrico seco. Dado el peso volumétrico seco, ambos parámetros mecánicos disminuyen con el aumento del tamaño de granos, por tanto, es posible que un buen comportamiento observado en laboratorio del material se deteriore en campo.

2.1 Metodología

Los terraplenes de prueba de este estudio constaron de un material de cantera, constituidos principalmente de lutitas y areniscas; muy meteorizadas y deleznable. El banco se encuentra en un sector aledaño al depósito de jales (Figura 1).



Figura 1. Vista aérea de la excavación del banco.

Debido a la naturaleza del material del banco, el corte y acarreo es uno de los factores primordiales, ya que esto puede generar un alto contenido de partículas finas, por lo tanto, la maquinaria de corte utilizada fue una excavadora CAT 326, apta para la dureza del material. El material se coloca en zonas previamente asignadas mediante camiones de volteo. Después, se realiza el extendido del material en capas de 35 cm; y, por último, se realiza la compactación, mediante un vibrocompactador de 16 toneladas. La información disponible, resultado de la evaluación previa al uso del material de banco, consta de resultados de laboratorio y de campo para espesores de capa compactada igual a 30 y 45 cm.

Para este estudio se construyeron 3 terraplenes, con lo cual se realizó el primero mediante motoconformadora (Terraplén 1); y segundo (Terraplén 2) tendido mediante un *bulldozer D6 LGP*, compactados entre 4 a 6 ciclos, en función de antecedentes de la utilización de un banco previamente analizado. El tercer terraplén se realizó a una sola capa de 45 cm, tendido mediante motoconformadora. Una vez compactados, se realiza la verificación de los niveles topográficos en cada placa metálica al final de cada ciclo de compactación (Figura 2).

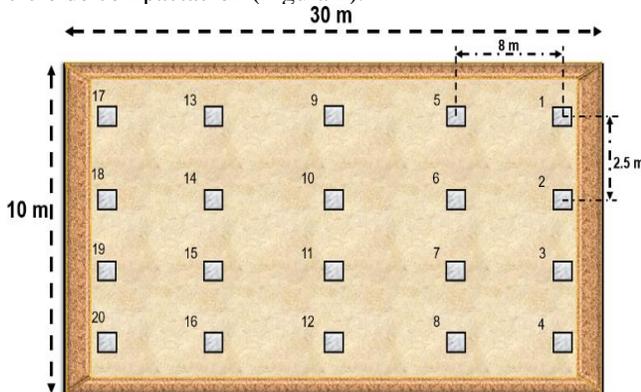


Figura 2. Vista en planta de la ubicación de las placas de control topográfico para el control de asentamientos.

Cabe mencionar, que los materiales deben ajustarse a la necesidad del proyecto, utilizando recursos asequibles, sin afectar la relación costo – beneficio. Este material se estudió con la finalidad de caracterizar y determinar la idoneidad para su uso como material de relleno masivo para las futuras etapas de construcción de los bordos del depósito de jales; así como definir el proceso constructivo y control de calidad necesario.

Los resultados fueron determinados a través de ensayos de: 1.-pruebas de densidad in situ por reemplazo de agua en suelo y roca (ASTM D5030); 2.- método estándar de ensayo para análisis por tamizado de agregados fino y grueso (ASTM C136); 3.-límites de consistencia (ASTM D4318); 4.-degradación del agregado grueso por abrasión en la máquina Los Ángeles (ASTM C535); 5.- Determinación de densidad relativa (ASTM C127 y C128); y 6.-Prueba de infiltración (Porchet - MINVU).

El material (empréstimo) utilizado previamente presentaba características similares al banco en estudio). En su momento, también se realizaron terraplenes de prueba para utilizar este material como relleno de bordo estructural. Los resultados de campo y laboratorio de este material de empréstimo fueron punto de partida para realizar la comparativa con respecto al nuevo material de banco. Dado que había poca disponibilidad del material de empréstimo, se optó por utilizar nuevo material. El empréstimo fue arrojado en zonas adecuadas como relleno de bordo estructural, una vez aprobada la utilización de ese banco. Antes de realizar la colocación de capas se realizaron diversas pruebas en laboratorio y en campo para definir la factibilidad de su uso. El proceso constructivo de excavar áreas para aprovecharlas como vaso y a su vez al aprovechar el producto excavado para relleno de bordo, resulta una alternativa sumamente asequible para las necesidades del proyecto, siempre y cuando se eliminen materiales o suelos no aptos que pongan en riesgo la integridad del bordo.

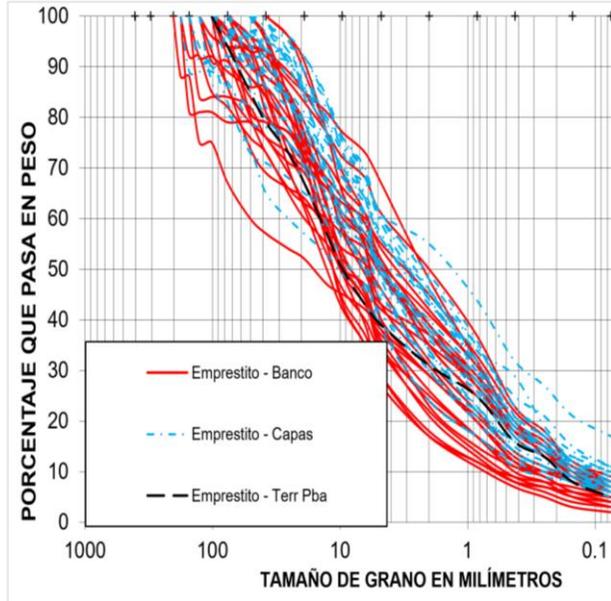
3 RESULTADOS OBTENIDOS

3.1 Empréstimo

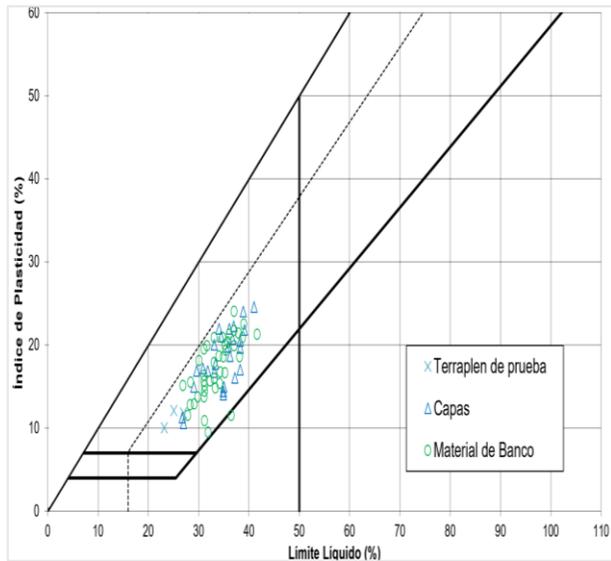
Antes de cada conformación de capa en el terraplén de prueba del empréstimo (conformado con capas de 30 cm) se tomaron muestras del banco para verificar granulometría y clasificar al material. La muestra del material tomado directamente del banco empréstimo tiene una clasificación SUCS (GW-GC) grava bien graduada con arena y arcilla de baja plasticidad (Figuras 3a y 3b). Esta misma clasificación se mantiene durante la construcción del terraplén de prueba; debido a esto, la producción de partículas finas tiende a crecer conforme se conforman las capas del terraplén.

Del análisis granulométrico del material de banco, el porcentaje que pasa el tamiz #200 varió entre 1% y 14%, mientras que en los ensayos granulométricos del material obtenido de los ensayos de reemplazo por agua de las capas el porcentaje que pasa el tamiz #200 varió entre 3 y 18%.

En la Figura 3a, se observa un resumen de los resultados granulométricos del material de empréstimo, mismos que sirvieron de referencia para caracterizar el material de banco a utilizar. A partir de estos resultados, se conformaron las bandas granulométricas para el control de calidad de los materiales que conforman los recrecimientos. En la Figura 3b, se muestran los límites de Atterberg, mismos que sirvieron para destacar que el material es poco plástico. El material utilizado para los límites pasa la malla #200, mismos que denotan una baja plasticidad ($I_p = 15\%$).



a) Granulometrías representativas (antes y después de colocar en terraplén)



b) Plasticidad del empréstito

Figura 3. Clasificación del empréstito (antes y después de colocar en terraplén de prueba).

La Figura 4, denota los resultados obtenidos del terraplén de prueba, valores de densidades seca y húmeda conforme se construyó el contrafuerte. Estos mantuvieron un orden de densidad seca de 2320 kg/m^3 y un contenido de humedad entre 3 y 6 %. Mientras que los resultados durante la ejecución de la obra se mantuvieron en 1952 kg/m^3 de la densidad seca y un contenido de humedad de 9 a 15%. La Figura 4 a su vez, muestra la densidad objetivo, mismas que resultaron de la compactación realizada ya colocada en el depósito de jales. Cabe destacar que estos valores de densidad sirvieron de punto de partida para establecer los

ciclos de compactación, espesor de capa colocada y equipo de compactación. El empréstito fungió como referencia para la utilización del banco en evaluación debido a que tienen el mismo origen de la roca (lutita altamente meteorizada). El banco en evaluación se detalla en los siguientes párrafos. Asimismo, el interés de mostrar la Figura 4 recae en demostrar que el contenido de humedad es una variable que afecta directamente la densidad de la capa colocada, esto es, a más humedad, mayor densidad. Por lo tanto, al tener materiales similares, se optó por controlar los parámetros de humedad observados en el empréstito para el banco en evaluación.

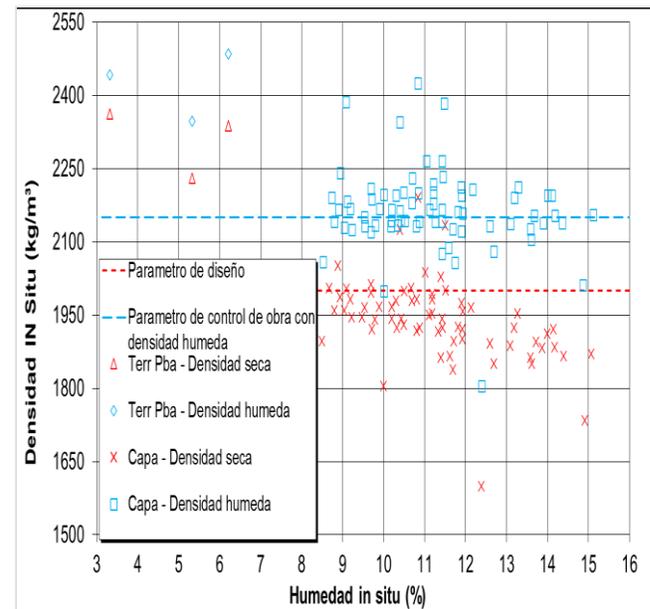


Figura 4. Densidad de material del empréstito.

3.2 Banco en evaluación

Para este estudio se construyeron 3 terraplenes, con lo cual el primero se conformó mediante motoconformadora (Terraplén 1); y segundo (Terraplén 2) tendido mediante un bulldozer D6LGP, compactados entre 4 a 6 ciclos. El tercer terraplén se realizó a una sola capa de 45 cm, tendido mediante motoconformadora. Es necesario llevar un buen control de calidad (QC) y administración de la calidad (QA) en el proyecto, con la participación del constructor, el diseñador, el dueño del proyecto y los responsables de QA y QC. La ejecución de los trabajos debe ser controlada en su totalidad, misma que se encuentra ligada la necesidad de controlar los trabajos de campo. La verificación de estos trabajos no sólo ha de referirse a que el constructor ejecute todas las operaciones que se le encomienden, sino también a que se alcancen en la obra los resultados técnicos exigidos por el diseñador del proyecto.

De los resultados de los análisis granulométricos del material del banco, presentaron una clasificación SUCS, GW grava bien graduada con arena, contando con un porcentaje de finos en banco de 2%. La Figura 5 muestra los resultados de las granulometrías del banco en evaluación (previo a compactación), y a su vez, de los terraplenes en estudio (material de banco en evaluación

colocado y compactado). Los resultados de los materiales antes y después de compactar, se analizaron con la finalidad de observar la rotura de partículas debido a la erodabilidad del material. Con respecto a este último rubro se definió la maquinaria a utilizar para corte, tendido y compactación. El porcentaje de partículas finas del material bandeado y compactado incrementó hasta un máximo de 10 %. Con respecto al empréstito, se aprecia una similitud en la rotura de partículas que existe en este material de banco.

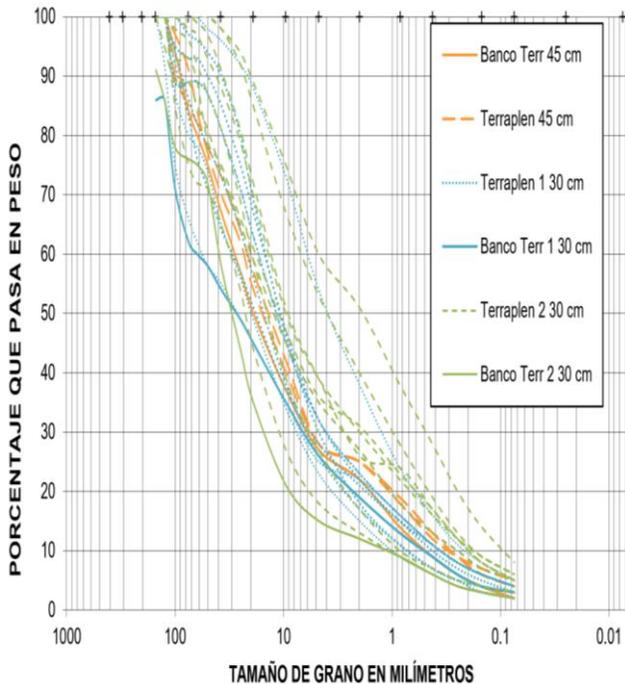


Figura 5. Granulometría material de banco (antes y después de conformar el terraplén).

Del material extraído del banco en evaluación se realizaron ensayos de degradación del agregado grueso por abrasión en la máquina Los Ángeles (ASTM C535), con la finalidad de determinar el valor de desgaste y la granulometría posterior al desgaste; con la finalidad de observar la degradación que puede ocurrir en el material. La Figura 6 muestra los resultados de esta prueba, extrayendo de dos sondeos muestras directas del banco de materiales. Se realizó su análisis granulométrico (líneas continuas) y posteriormente se tomaron las muestras según lo indica la norma ASTM C535 para el ensayo de abrasión (línea punteada). La Figura 7 denota que el material de origen es una (GW) grava bien graduada y se degrada a (SW-SC) arena bien graduada con arcilla.

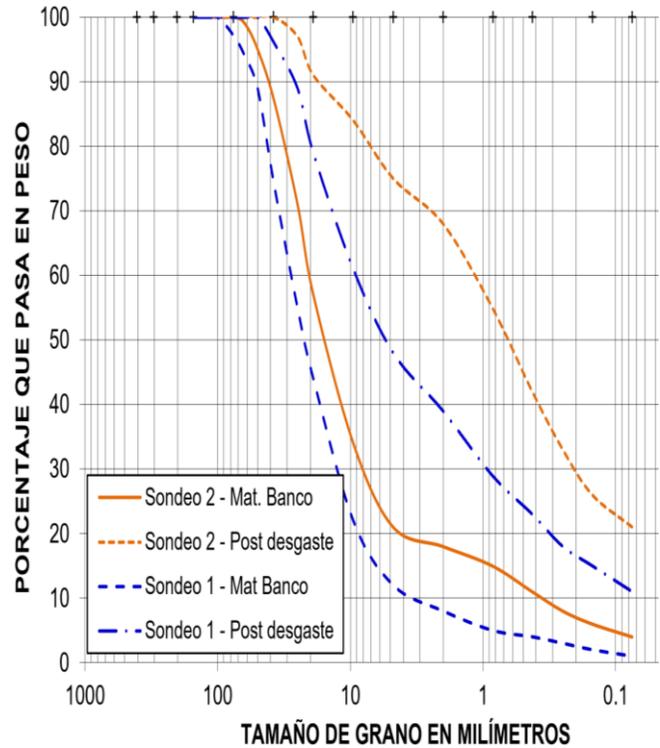


Figura 6. Granulometría material de banco (antes y después del desgaste, 1000 ciclos para ambos sondeos).

4 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados del terraplén de prueba del empréstito (parámetro de control de la celda 1) se asemejan más a los resultados del terraplén de prueba 1 del banco en evaluación, (tendido con motoconformadora). Las capas de espesores mayores tienden a degradarse más durante la conformación y la compactación de la capa (Figura 7).

Con base en los pesos volumétricos obtenidos del material empréstito y de acuerdo con la hipótesis: los suelos compactados hasta el mismo peso volumétrico seco con diferentes métodos de compactación adquieren las mismas propiedades, se pudo determinar que el material del banco en evaluación tenía el comportamiento similar al empréstito. La única diferencia recae en la meteorización del material ya que el empréstito al ser tratado con los diversos tratamientos producía un mayor contenido de partículas finas con respecto al banco en evaluación (máximo de 18% y máximo de 10%, respectivamente). En los materiales de empréstito y del nuevo banco, se observa que el rango de humedad juega un papel importante en ambos materiales, situando estos entre 13 y 15 % de humedad en una densidad seca menor a 2000 kg/m³, valor adoptado para el análisis de estabilidad de la presa.

Al utilizar las curvas granulométricas obtenidas de megacalas del material de empréstito, se pudo determinar los límites granulométricos que debe cumplir el material del nuevo banco (determinadas a partir del comportamiento observado en el terraplén 1 y el material de empréstito). Esto se logró al establecer un límite superior y uno inferior como parámetro de control (tomando la curva

granulométrica de material más grueso y fino, respectivamente), mostrado en la Tabla 1. Los límites establecidos para el llevar el control de calidad y aseguramiento de la calidad, se definió a partir del comportamiento de los materiales previamente analizados.

Tabla 1. Parámetros de control de tamaño de partículas.

Tamiz	Banco		Capa colocada	
	Lim. superior (% que pasa)	Lim. inferior (% que pasa)	Lim. superior (% que pasa)	Lim. inferior (% que pasa)
8"	--	100	--	100
3"	100	70	--	70
1½"	90	55	100	55
# 4	50	20	80	20
#200	8	0	15	0

Al definir un control establecido en la humedad de los materiales, se puede lograr un incremento de la densidad de capa colocada, sin llegar a sobrecompactarla, esto se observó conforme al comportamiento de los materiales utilizados (corte-acarreo-conformación-compactación).

El terraplén 1 tendido mediante motoconformadora, se estabiliza a 4 ciclos, obteniendo la menor magnitud de deformaciones, mismas que fueron observadas en la 1er capa del terraplén de capas de espesor de 30 cm. A 6 ciclos se observó que el material presenta agrietamiento. Por esta razón se determinó que a 4 ciclos es la mejor manera de conformar el terraplén, obteniendo los valores de descenso promedio mostrados en la Figura 8.

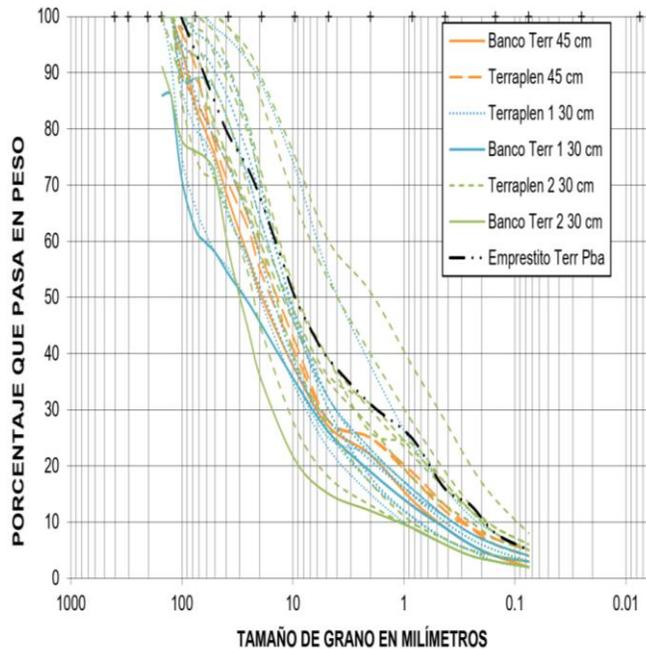


Figura 7. Granulometría de las canchas de prueba.

Evaluación del terraplén de prueba

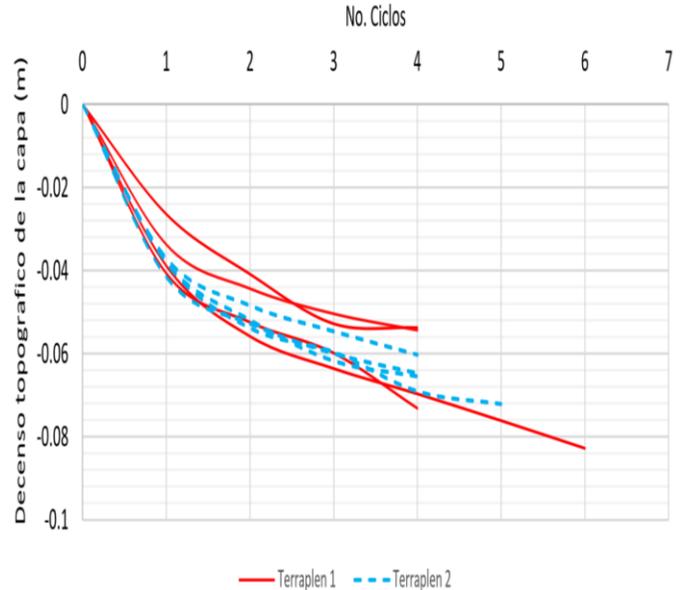


Figura 8. Descenso topográfico medido en los terraplenes de prueba.

En la capa final de los terraplenes 1 y 2 se realizaron 2 ensayos de análisis de infiltración tipo Porchet en cada terraplén. La Tabla 2 muestra los resultados de conductividad hidráulica lo cual el material produce un buen drenaje con respecto a la clasificación SUCS (SW-SC), según Juárez – Badillo, 2006. La finalidad de tener un buen drenaje con el material que conforma los bordos del depósito recae en evitar excesos de presión de poro que puedan resultar en fuerzas adicionales que ocasionen una inestabilidad, y con ello, un deslizamiento que provoquena falla en los taludes.

En cuanto a los resultados de densidad obtenidos in situ, el terraplén 1 (construido en capas de 30 cm) se mantienen con valores de densidad promedio de 2180 kg/cm³. Las capas de 30 cm tienen poca diferencia en cuanto a su densidad con respecto a los terraplenes construidos en capas de mayor espesor.

Tabla 2. Permeabilidad medida mediante ensayo Porchet.

	Prueba 1 (cm/s)	Prueba 2 (cm/s)	k _{prom} (cm/s)
Terraplén 1 (capa de 30 cm)			
Ensayo 1	4.36E-03	8.50E-03	-
Ensayo 2	3.99E-03	7.21E-03	-
Promedio	4.17E-03	7.85E-03	6.01E-03
Terraplén 2 (capa de 45 cm)			
Ensayo 1	4.07E-03	3.98E-03	-
Ensayo 2	4.63E-03	3.61E-03	-
Promedio	4.35E-03	3.80E-03	4.07E-03

5 CONCLUSIONES

Se presentó la metodología para evaluar material de banco para uso de construcción en los terraplenes de recrecimiento en un Depósito de Jales. Esta metodología incluye la comparativa de un material previamente estudiado, de características similares.

Los materiales presentados en este estudio constituyen una solución para una necesidad específica, es decir, se debe buscar que los materiales sean compatibles con la disposición del terreno para las demandas de cada proyecto.

Los suelos compactados hasta el mismo peso volumétrico seco con diferentes métodos de compactación adquieren las mismas propiedades, como se demostró con el material del nuevo banco y el empréstito utilizado inicialmente. El proceso constructivo de excavar áreas para aprovecharlas como vaso y a su vez al aprovechar el producto excavado para relleno de bordo, resulta una alternativa sumamente asequible para las necesidades del proyecto siempre y cuando se eliminen materiales o suelos no aptos que pongan en riesgo la integridad del bordo. Tal es el caso que las excavaciones que se realizaron en el banco de materiales.

El problema de la compactación de los suelos se encuentra ligado a la necesidad de controlar los trabajos de campo. La verificación de estos trabajos no sólo ha de referirse a que el constructor ejecute todas las operaciones que se le encomienden, sino también a que se alcancen en la obra los resultados técnicos exigidos por el diseñador del proyecto.

Con los resultados obtenidos en este caso de estudio se lograron establecer parámetros de control de obra, tal es el caso de los materiales a utilizar en cantera, el equipo de tendido, así como de compactación y por lo tanto, el número de ciclos de compactación.

Para demostrar la factibilidad del uso de la metodología establecida en este artículo se cuenta con un análisis de estabilidad de equilibrio límite para el recrecimiento de la presa utilizando el material de banco. El análisis tuvo como resultado que la construcción de los rellenos de material de banco de lutitas altamente meteorizadas para el recrecimiento de los bordos otorga una condición de estabilidad satisfactoria para una condición permanente.

Por otro lado, el monitoreo a largo plazo de un depósito de jales requiere de instrumentación geotécnica. Esto permite análisis más sofisticados (modelación numéricos, elemento finito, etc.) que requieren mediciones durante la construcción de la estructura terrea; incluso en un terraplén de prueba. Así, se pueden determinar valores más precisos de los parámetros que definen el comportamiento de los materiales que constituyen las estructuras de los bordos a largo plazo. En consecuencia, se puede tener una mejor aproximación del estado de esfuerzos real en la estructura.

REFERENCIAS

- ASTM International (2013) D5030 Standard Test Methods for Density of Soil and Rock in Place by the Water Replacement Method in a Test Pit
- ASTM International (2019) C136 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates
- ASTM International (2018) D4318 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils
- ASTM International (2016) C535 Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine
- ASTM International (2016) C127 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate
- ASTM International (2020) D2487 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)
- ASTM International (2019) D2216 Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass
- ASTM International (2020) C117 Standard Test Method for Materials finer than 75-um (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing
- ASTM international (2014) D75 Standard Practice for Sampling Aggregates
- Bertram, G.E. (1973) “Field tests on compacted rockfill”, Embankment Dam Engineering, Casagrande Volume Wiley & Sons, N.Y., pp. 109-200.
- Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (2006). Mecánica de suelos: Fundamentos de la mecánica de suelos. Tomo 1 (1a ed.). México, D.F.: Limusa.
- Ministerio de viviendas y Urbanismo – Chile (1996). Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos – Calculo del coeficiente
- Porchet – MINVU
- Rico – Rodriguez, A. & Del Castillo – Mejía, H. (1992). Peso volumétrico, consideraciones sobre compactación de suelos en obras de infraestructura de transporte – Instituto Mexicano del Transporte
- Auvinet-Guichard, G. & Sanchez Guzmán, J. (2020). Diseño de terraplenes ligeros para control de asentamientos. Ingeniería Investigación y Tecnología volumen XXI (número 4), octubre-diciembre 2020 1-9 ISSN 2594-0732 FI-UNAM.