Estimación del tipo de material a partir de resultados del penetrómetro dinámico PANDA en un depósito de jales

Material type estimation from dynamic penetrometer PANDA results in a tailings dam

Jonatan CANDELARIA[1]✉, Jesús SOLÍS[1], Sergio HERNÁNDEZ[1], José Alfredo PROMOTOR[1], Sergio MEDINA[1] y Osvaldo FLORES[2]

[1] Flopac Geotecnia S.A. de C.V., Ciudad de México, México

[2] instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de México, Ciudad de México, México

RESUMEN: El equipo de Penetrómetro dinámico ligero a energía variable (PANDA) se ha destinado principalmente al control de calidad de compactación, dejando de lado su uso para la clasificación o identificación del tipo de material, tal como se ha hecho con resultados del ensaye de CPTu. Con un sondeo de PANDA se aprovecha la versatilidad de ser un equipo compacto y con posibilidad de acceder a zonas donde es complicado ingresar con equipos convencionales para la ejecución de SPT y CPTu, con la finalidad de caracterizar los materiales en áreas específicas, de difícil acceso o donde no se requiere llegar a una profundidad mayor a los 5 m. En el presente artículo se propone el desarrollo de una correlación para identificar el tipo de material a partir de la resistencia dinámica de punta (q_d) de sondeos de PANDA, llevados a cabo en un depósito con descarga de jales fluidos (*slurry*), partiendo de una calibración con resultados de pruebas de laboratorio en muestras de jales gruesos y jales finos (lamas) extraídas en el mismo punto de ejecución de los sondeos de PANDA, con el propósito de contar con una expresión con mayor aplicabilidad en los jales, que permita una rápida caracterización en zonas superficiales o de difícil acceso dentro del depósito.

ABSTRACT: The Light Dynamic Variable Energy Dynamic Penetrometer (PANDA) equipment has been used mainly for compaction quality control, leaving aside its use for soil type classification or identification, as has been done with CPTu test results. The PANDA sounding, has the versatility of being a compact equipment and with the possibility of accessing areas where it is difficult to enter with conventional equipment for the execution of SPT and CPTu, with the purpose of characterizing the materials in specific areas, of difficult access or where it is not necessary to reach a depth greater than 5 m. This paper proposes the development of a correlation to identify the type of material from the dynamic tip resistance (q_d) of PANDA drillings carried out in a deposit with fluid tailings discharge (slurry), based on a calibration with laboratory test results on samples of coarse and fine tailings (slimes) extracted at the same point of execution of PANDA soundings, in order to have an expression with greater applicability in tailings that allows a rapid characterization in shallow areas or difficult to access within the TSF.

✉*Autor de Correspondencia: jcandelaria.flopac@gmail.com*

1 INTRODUCCIÓN

El penetrómetro dinámico ligero a energía variable, también conocido como PANDA (*Pénétromètre Autonome Numérique Dynamique Assisté par Ordinateur*) es una herramienta que ha ganado relevancia en los últimos años dada su practicidad y versatilidad. Debido a su rápida implementación, asequibilidad e idoneidad para la mayoría de los tipos de suelos, los penetrómetros dinámicos ligeros están presentes en la práctica geotécnica actual en muchos países del mundo (SolSolution, 2023).

El uso de esta herramienta se ha destinado principalmente al control de calidad durante la construcción de terraplenes y en el área de los depósitos de jales, se ha implementado como control de compactación del muro o cortina retenedora, tal como se detalla en los trabajos de Villavicencio *et al. (*2007 y 2011). En años recientes se han buscado nuevas aplicaciones a esta herramienta, como en el trabajo de Dudley y Llano- Serna (2023) en donde se detalla un procedimiento para estimar el parámetro de estado (ψ) *in situ* de los jales con el uso del PANDA.

Con el objetivo de ampliar el uso y aplicación de este instrumento, y aprovechando la versatilidad de ser un equipo compacto, con posibilidad de acceder a zonas donde es complicado ingresar con equipos convencionales para la ejecución de SPT y CPTu para caracterizar los materiales en áreas específicas o superficiales, en este trabajo se propone el desarrollo de una correlación para identificar el tipo de material a partir de la resistencia dinámica de punta (q_d) de sondeos de PANDA llevados a cabo en un depósito de jales, partiendo de la correspondencia de

la resistencia medida con este instrumento y los resultados de pruebas de laboratorio.

2 GENERALIDADES DE LA PRUEBA

El principio básico de funcionamiento de esta prueba consiste en hincar un tren de barras en el suelo mediante el impacto de un martillo de masa estándar (2 kg) sobre una cabeza de golpeo conectada a un tren de barras de 14 mm de diámetro, el cual se encuentra provisto en su extremo de una punta cónica metálica de sección igual a 2 cm^2 en su modalidad de control de compactación (Villavicencio *et al.,* 2007). Cada golpe del martillo genera un esfuerzo a través del tren de barras hasta la punta cónica para lograr la penetración en el terreno. Durante este proceso de hincado y con el uso de sensores conectados a un equipo de cómputo portátil, se registra de manera continua la profundidad de penetración (e) y la resistencia de punta del suelo (q_d). La q_d es calculada automáticamente por el ordenador mediante la fórmula holandesa propuesta por Sanglerat *(*1972) (Ecuación 1).

$$q_d = \frac{1}{A_c} \times \frac{E}{e} \times \frac{M}{M+P} \quad (1)$$

Donde A_c = área de la punta, E = energía aplicada, M = masa del martillo y P = masa del tren de barras y el cabezal. Con este procedimiento se obtiene una gráfica de resistencia de punta *vs* profundidad, denominada penetrograma (Figura 1). Debido a que el hincado y extracción de las barras se realiza de forma manual, la profundidad que se puede alcanzar ronda los 5 m, en suelos con resistencia de punta (q_d) menor a 50 MPa (SolSolution, 2023), lo cual es suficiente para trabajos como el control de calidad en depósitos de jales debido a las características de tamaño máximo de partícula de jal, que corresponde a arena, así como para el reconocimiento geotécnico superficial. En México no se cuenta con una norma que establezca el procedimiento de ejecución de la prueba, por lo que se puede hacer uso de normas internacionales como la francesa NF P 94-105 (AFNOR, 2012) o la chilena NCh3261-2012 (INN, 2012).

3 METODOLOGÍA

3.1 *Ejecución de sondeos base*

Los trabajos descritos a continuación se llevaron a cabo en dos depósitos de jales o *Tailings Storage Facilities* (TSF, por sus siglas en inglés) pertenecientes a la misma unidad minera, denominados como TSF A y TSF B. En ambos depósitos se descargan jales fluidos, los cuales son producto de la extracción y proceso principalmente de zinc, y en menor medida de algunos otros minerales como plomo y cobre.

Los sondeos base para la determinación de la correlación se realizaron en el TSF A, el cual se encontraba en su última etapa de operación, ya que los sondeos se realizaron aproximadamente 3 meses después de la última descarga de jal.

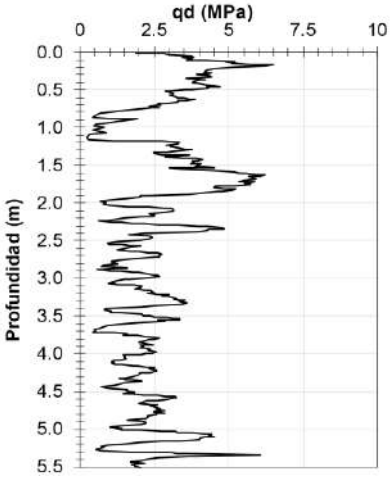


Figura 1. Gráfica resultante de un ensayo de PANDA ejecutado en un depósito de jales para este estudio.

El muestreo de materiales se realizó con calas superficiales y pozos a cielo abierto (PCA). Con las calas se obtuvieron 47 muestras (Figura 2) y para el caso de los PCA, se hicieron 16 sondeos (Figura 3a), alcanzando una profundidad de 5 m con recuperación de muestra a cada metro, extrayendo un total de 80 muestras. La altura de cada una de las muestras extraídas fue de 30 a 40 cm, aproximadamente, tanto para las calas como para los PCA.

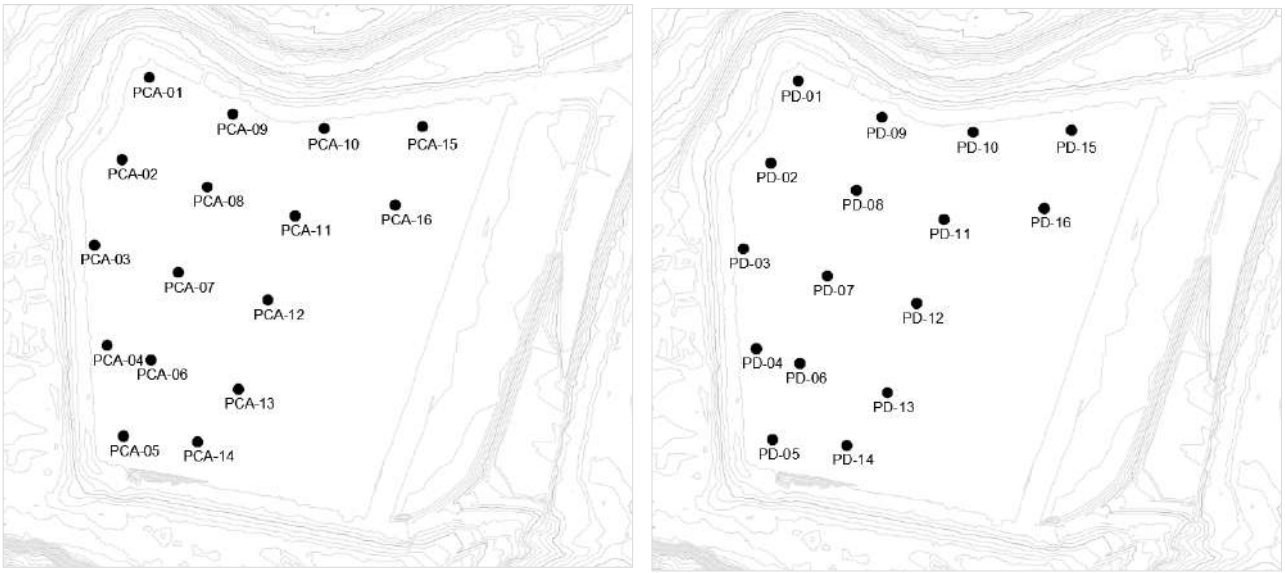
Una vez obtenidos los especímenes, fueron llevados al laboratorio para estimar el porcentaje de finos y clasificar las muestras dentro de las cuatro categorías para clasificación de jales propuesta por Medina *et al.* (2022), las cuales se dividen según su contenido de finos (%CF): gruesos 1(%CF≤25), gruesos 2 (25<%CF≤50), finos (50<%CF≤75) y lamas (%CF>75).

Figura 2. Ubicación de las calas superficiales en el TSF A.

Posteriormente, se llevó a cabo una campaña de exploración mediante 16 sondeos de PANDA que alcanzaron una profundidad de 5 m, realizando los ensayes en las mismas coordenadas donde previamente se realizaron los PCA (Figura 3b).

En la Figura 3 se muestra una comparación entre la resistencia dinámica de punta y el porcentaje de finos para 4 sondeos ejecutados, en donde se resalta con un recuadro de color distinto el tipo de material, de acuerdo con la clasificación en función del %CF.

Tomando como ejemplo la Figura 4a, donde los resultados de las muestras de laboratorio indican que predominan los jales gruesos 1 y 2, en la mayor parte del sondeo se observan resistencias dinámicas de cono mayores a 2 MPa, incluso se alcanza resistencias superiores a 5 MPa. En contraste, en la Figura 4d, donde predominan las lamas se observa una q_d menor a 1 MPa a partir de los 2.7 m de profundidad, donde se tiene un %CF cercano al 90%. Para el caso de los sondeos donde se observa la presencia de jales finos, se obtuvieron valores de q_d de entre 1 y 2 MPa, tal como se distingue en las Figuras 4b y 4c. Esta comparativa se realizó con cada uno de los 16 sondeos de PANDA con su correspondiente muestra de jal obtenida de calas superficiales y PCA.



a) PCA b) Sondeos de PANDA

Figura 3. Ubicación de sondeos en el vaso de TSF A.

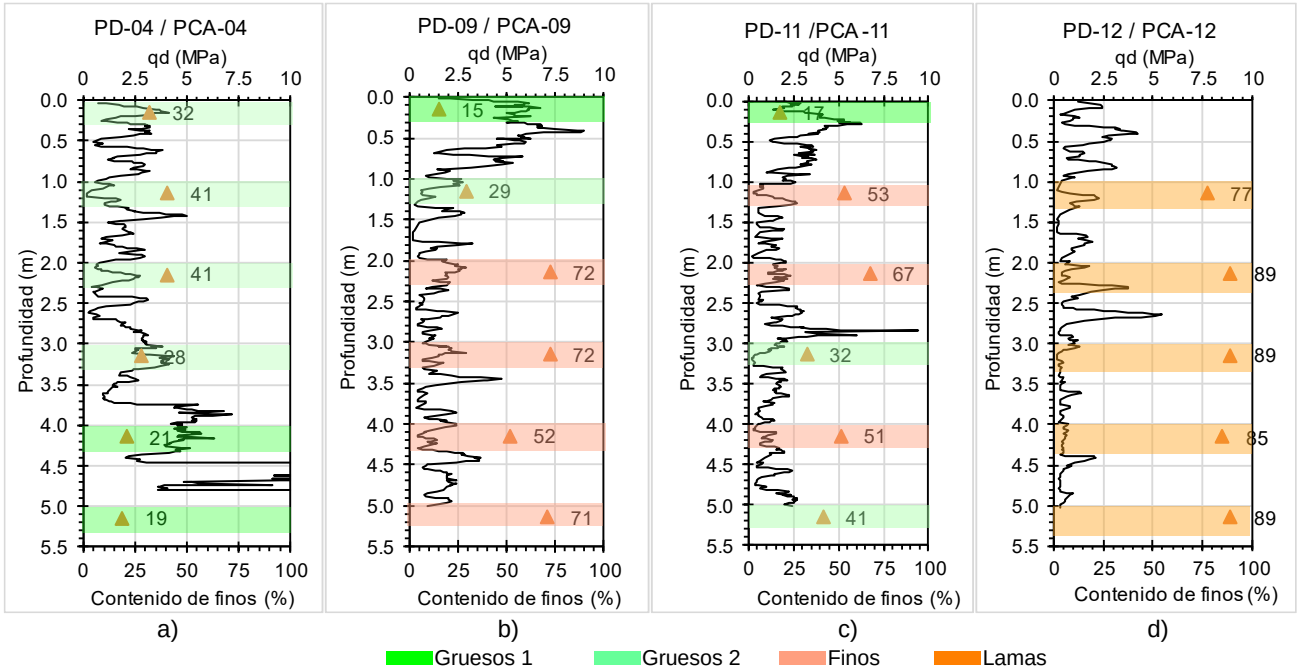


Figura 4. Comparación de q_d vs %CF a distintas profundidades para 4 sondeos de PANDA ejecutados en TSF A

3.2 *Desarrollo de la correlación*

El desarrollo de la correlación para estimar el tipo de suelo en función de q_d se llevó a cabo mediante la evaluación de la resistencia de punta y el porcentaje de finos en cada uno de los 16 puntos, con información de calas superficiales, PCA y PANDA. Dicha evaluación consistió en estimar el promedio de la q_d en un rango de 15 a 20 cm por encima y por debajo de la profundidad media a la que se extrajo la muestra de jal de las calas y los PCA, esto debido a que la altura de la muestra fue aproximadamente de 30 a 40 cm.

Posteriormente, se relacionó la resistencia de punta promedio del penetrómetro y el contenido de finos obtenido de las pruebas de laboratorio. Con la finalidad de lograr un mejor ajuste y reducir la dispersión de datos, se realizó un análisis estadístico mediante diagramas de cajas o *box plot,* buscando eliminar los datos atípicos de q_d en el rango de la profundidad a la que fue extraída cada muestra. Con el análisis anterior se obtuvo como resultado una base de datos, a partir de la cual fue posible realizar una gráfica que correlaciona el contenido de finos con la resistencia de punta del PANDA, la cual se muestra en la Figura 5. De acuerdo con los resultados obtenidos se concluyó que una línea de tendencia potencial es la que logra el mejor ajuste entre el porcentaje de finos de laboratorio (%CF) y la resistencia punta (q_d), para el cuál se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.79, y aunque el valor de R^2 no se debe tomar por sí sólo para avalar la dependencia o correlación entre variables (Martínez, 2005), en este ejercicio se consideró aceptable. Adicionalmente, a la línea de tendencia principal se incluyó un límite superior e inferior, para tomar en cuenta la variabilidad de los datos.

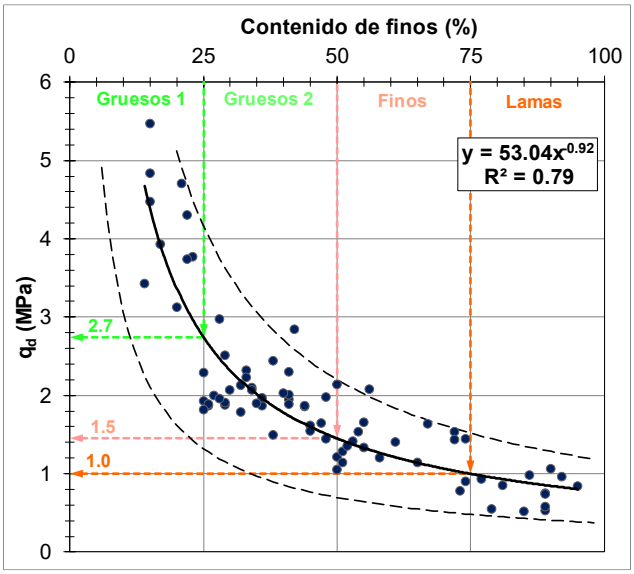


Figura 5. Correlación del %CF vs la q_d obtenida con sondeos de PANDA para estimar el tipo de material.

Con estos resultados se distingue, de manera general, que un valor de q_d=1.5 MPa separa a los materiales gruesos de los finos. De manera particular, una q_d menor a 1 MPa caracteriza a las lamas, mientras que con una q_d entre 1 y 1.5 MPa se identifican materiales finos o de transición. Los gruesos 2 cuentan con una q_d entre 1.5 y 2.7 MPa; y finalmente, los materiales con mayor resistencia son los gruesos 1 y se identifica por alcanzar una q_d>2.7 MPa.

3.3 *Caso de aplicación*

Una vez desarrollada la correlación a partir de los datos recabados en el TSF A, se buscó la primera aplicación de la misma. El sitio seleccionado para la aplicación de la correlación fue el TSF B, ubicado dentro de la misma unidad minera.

El TSF B fue construido con el método aguas arriba, con descarga de jal fluido mediante espigas, manejando una longitud de playa amplia, con el objetivo de que los jales gruesos se depositaran cerca de la cortina. Lo anterior se corroboró con una campaña de exploración en el depósito, la cual incluyó sondeos de CPTu y SPT, a partir de los cuales se realizó la caracterización geotécnica, donde se identificaron materiales gruesos 1 cerca de la estructura retenedora (Figura 7). De acuerdo con las necesidades de la unidad minera, el TSF B adoptó un nuevo modo de operación, el cual consiste en un ciclo de excavación y descarga. El jal extraído es utilizado como relleno de mina y a su vez, la excavación, con profundidades máximas de 5 m permite nuevamente la descarga de ja fluido en el depósito.

Debido a las necesidades operativas de la unidad minera, se planteó la sobreelevación del TSF B mediante el método aguas arriba, para lo cual era necesario conocer los materiales sobre los cuales se desplantará el nuevo bordo de sobreelevación. De aquí surgió la necesidad de realizar una campaña de exploración, sin embargo, la última descarga de jal había sido realizada tan sólo un mes y medio atrás, lo cual imposibilitaba el uso de un equipo de CPTu o SPT. Ante esta situación se propuso llevar a cabo una campaña de exploración que constó de 20 sondeos de PANDA, con la finalidad de estimar el tipo de suelo presente en la zona superficial del vaso. En la Figura 6 se muestra una sección del depósito analizado, donde se indica la ubicación de 4 sondeos de PANDA (PD), junto con la localización de los sondeos de SPT y CPTu de la campaña de exploración anterior, los cuales fueron utilizados para la caracterización geotécnica de dicha sección.

En la aplicación de la correlación en este caso de estudio se tomaron en cuenta dos elementos para realizar una validación cualitativa de la misma. El primero fue la caracterización geotécnica general del depósito que se realizó previamente, la cual indica la predominancia de jales gruesos cerca de la cortina retenedora (Figura 7). El segundo elemento de

validación fue el jal fino descargado en la última etapa operativa, producto del proceso de cicloneo realizado en un depósito adyacente.

En la Figura 8 se presenta un ejemplo de la aplicación de la correlación en el sondeo PD-B' ejecutado en el TSF B, donde se proyectan los límites de q_d para la identificación de cada tipo de material, así como una columna con la simbología (escala de colores) para distinguir el tipo de material asociado. De manera general se puede observar que de los 0 a los 2.6 m de profundidad predominan los materiales identificados como lamas, con una intercalación de jales finos y gruesos 2, mientras que a partir de los 2.6 y hasta los 5.5 m se distingue una intercalación de jales gruesos 1 y gruesos 2.

En la Figura 9 se muestra la aplicación de la correlación en todos los sondeos de PANDA realizados en la sección de análisis. Partiendo de los dos elementos de validación mencionados anteriormente y tomando como referencia el límite de la última excavación (línea magenta), se puede observar que los materiales de jales finos y lamas identificados en cada sondeo de PANDA quedan por encima de dicho límite, lo que coincide con la descarga de material fino resultante del cicloneo en la última etapa operativa. Por debajo del límite de excavación, y de acuerdo con la q_d registrada en todos los sondeos de PANDA, se identifican materiales de gruesos 1 a gruesos 2, coincidiendo con la caracterización geotécnica general del depósito definida previamente.

Este ejercicio de identificación del tipo de material se realizó en tres secciones adicionales del mismo depósito, en las cuales se obtuvo una buena concordancia entre el tipo de material identificado mediante la correlación propuesta y los materiales presentes en el depósito, de acuerdo con las condiciones de descarga efectuada y la caracterización geotécnica previa en cada sección.

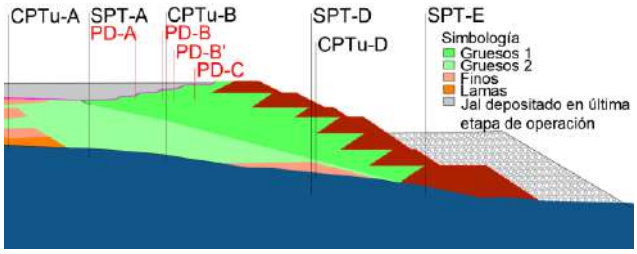


Figura 7. Distribución de materiales y ubicación de sondeos en la sección de análisis en el TSF B.

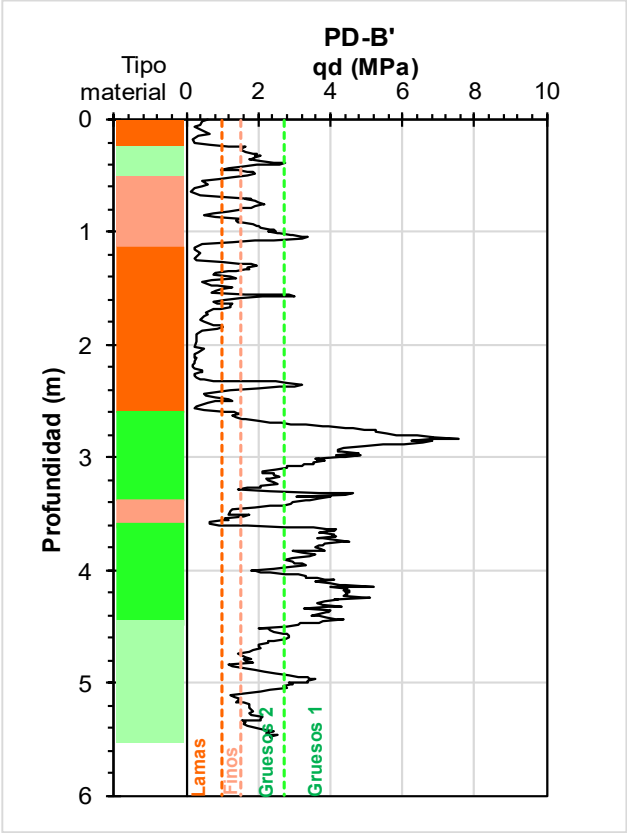


Figura 8. Ejemplo de aplicación de correlación en un sondeo de PANDA llevado a cabo en el TSF B.

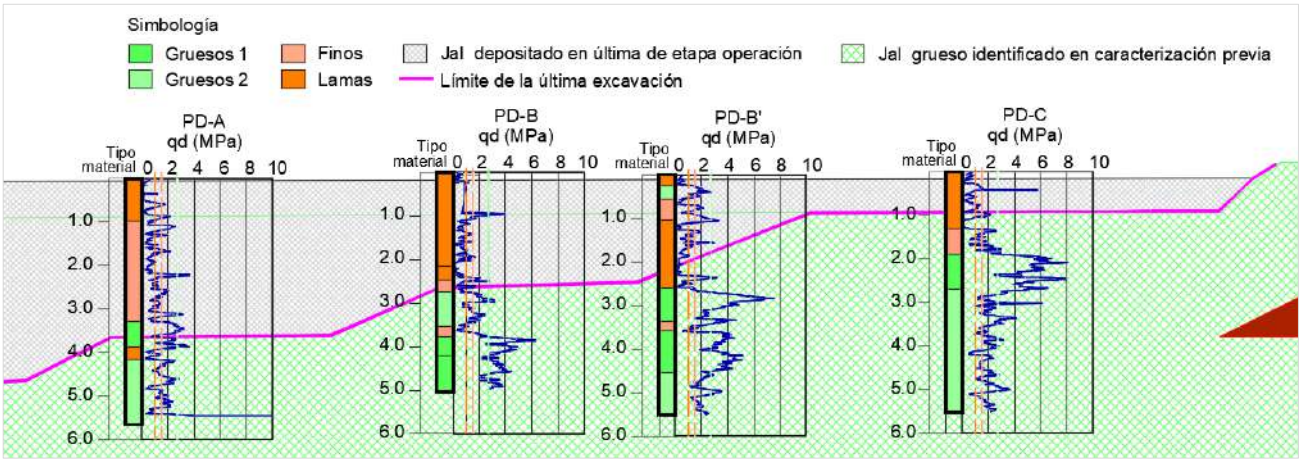


Figura 9. Caso de aplicación de la correlación obtenida para determinar el tipo de material en el depósito de jales TSF B.

4 DISCUSIÓN

El objetivo de este trabajo fue desarrollar una correlación que permitiera identificar, de manera rápida y aproximada, el tipo de materiales presentes en un depósito de jales, aprovechando la practicidad del equipo PANDA, en una zona donde el acceso de un equipo de CPTu o SPT era limitado. Si bien estos trabajos se llevaron a cabo en campo y no en laboratorio bajo condiciones controladas, los resultados obtenidos indican una buena coincidencia entre el tipo de material identificado mediante la correlación propuesta y los materiales presentes en el depósito, de acuerdo con las condiciones de descarga efectuada y la caracterización geotécnica previa.

Bajo el contexto anterior, es recomendable realizar un mayor número de pruebas de PANDA *in situ* con su correspondiente extracción de muestra alterada mediante PCA o SPT, con la finalidad de aumentar el tamaño muestral del análisis estadístico. Una opción adicional sería la ejecución de sondeos de PANDA en cámaras de calibración con muestras de jal, controlando la granulometría de los materiales en laboratorio, con la finalidad de corroborar y, en dado caso, ajustar la correlación aquí presentada.

Un punto adicional a considerar es el proceso de consolidación de los materiales, ya que estos sondeos se realizaron en jales cuya depositación no era mayor a 3 meses, por lo que la respuesta en la resistencia de punta puede resultar diferente en materiales relativamente secos.

5 CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo fue desarrollar una correlación que permitiera identificar, de manera rápida y aproximada, el tipo de materiales presentes en un depósito de jales, aprovechando la versatilidad y practicidad del equipo PANDA. Como resultado se encontró buena concordancia entre el tipo de material identificado mediante la correlación propuesta y los materiales presentes en el depósito, de acuerdo con las condiciones de descarga efectuada y la caracterización geotécnica previa, con lo que se concluye que la correlación es válida. Para desarrollar dicha correlación se llevó a cabo una serie de sondeos de PANDA y PCA. Posteriormente, se relacionó la resistencia de punta del penetrómetro (q_d) y el contenido de finos obtenido de las pruebas de laboratorio en las muestras de jal extraídas de los PCA, con la cual se construyó una gráfica a partir de la cual se definió un límite de q_d=1.5 MPa como la frontera entre jales gruesos y jales finos.

Es importante resaltar que el propósito de este trabajo fue desarrollar una correlación que permita identificar, de manera rápida y aproximada el tipo de materiales presentes en un depósito de jales, mas no determinar de manera exacta el contenido de finos o indicar la clasificación de los materiales, de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Si bien estos trabajos se llevaron a cabo en campo y no en laboratorio bajo condiciones controladas, los resultados obtenidos en el caso de aplicación indicaron que existe una buena concordancia entre el tipo de material identificado mediante la correlación propuesta y los materiales presentes en el depósito, no obstante, se recomienda complementar el estudio con pruebas de PANDA en cámaras de calibración con muestras de jal, controlando la granulometría de los materiales en laboratorio. De igual manera, es recomendable contar con un mayor número de casos de aplicación, tanto en jales recién depositados como en jales secos, con la finalidad de obtener un mayor tamaño muestral que permita un mejor ajuste o correlación entre variables.

REFERENCIAS

AFNOR (2012). “Method using variable energy dynamic penetrometer —Penetrometer calibration principle and method —Processing results — Interpretation NF P 94-105”, *French Standards Association,* Saint Denisse, France.

Dudley, O. y Llano-Serna, M. (2023). “Estimating in situ state of tailings using Panda Dynamic Penetrometer”, *Mine Waste and Tailings Conference 2023*, Brisbane, Australia, 48-59.

INN (2012). “Depósitos de relave - Control de compactación con penetrómetro dinámico ligero Nch 3261-12”, *Instituto Nacional de Normalización*. Santiago de Chile.

Martínez, E. (2005). “Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal”, *Anuario Jurídico y Económico Escurialense*. XXXVIII: 315-322.

Medina, S., Hernández, S., Candelaria, J., Promotor, J., y Flores, O. (2022). “Caracterización geotécnica de depósitos de jales”, *Memorias XXXI Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*, Publicación SMIG, Guadalajara, Jalisco, 317-330.

Sanglerat, G. (1972). “The penetrometer and Soil Exploration, Developments in Geotechnical Engineering”, *Elsevier Publishing*. Nueva York.

SolSolution (2023). “El Panda: Síntesis de correlación, manual de ayuda del software Websprint v1.8.0”.

Villavicencio, G., Espinace, R., Bacconnet, C., González, J., y Aliaga, J. (2007). “Control de compactación en tranques de arenas de relaves mediante el penetrómetro PANDA”, *VI Congreso Chileno de Geotecnia*. Valparaíso, Chile.

Villavicencio, G., Breul, P., Espinace, R., y Valenzuela, P. (2011). “Control de compactación con penetrómetro ligero en tranques de relaves, considerando su variabilidad material y

estructural", *Revista de la construcción*. Vol. 11, No. 1: 119-133.