

Correlación de valores de densidad con densímetro nuclear y cono de arena en un depósito con residuos mineros tratados con cal

Correlation of density values with nuclear densometer and sand cone in a stockpile with mining waste treated with lime

Carlos Ramírez de Arellano, Knight Piésold

Keith Viles, Knight Piésold

Carlos Omar Vargas, Industrias Peñoles

RESUMEN: En este artículo se aborda una comparación entre los valores de densidad obtenidos con medición directa en campo mediante cono de arena, respecto a la medición indirecta dada por un densímetro nuclear. Se revisan los procedimientos de medición de densidad con ambas técnicas y se expone la influencia que tiene la composición geoquímica y el tratamiento con cal del residuo minero sobre la desviación en las mediciones con la radiación nuclear. Durante la operación del depósito minero se valora la rapidez del densímetro nuclear, tanto de la ejecución como de la obtención de resultados; sin embargo, se propone tener un control periódico con algunas mediciones directas de cono de arena, con el objetivo de llegar a una correlación entre ambas técnicas.

ABSTRACT: This article discusses a comparison between density values obtained with direct measurement in the field by sand cone with respect to the indirect measurement given by a nuclear densometer. The state of the art on density measurement with both techniques is reviewed. The geochemical composition and the lime treatment of the mining residue on the deviation in measurements with nuclear radiation is exposed. During the operation of the mining deposit, the speed of the nuclear density meter is assessed, both in execution and in processing results; however, it is proposed to have a periodic control with some direct measurements of the sand cone, to reach a correlation between both techniques.

1 ANTECEDENTES

Como parte del diseño de cierre de un depósito de residuos mineros metalúrgicos del tipo *dry stack* en el norte de México, se prevé la construcción de un terraplén que cierre el valle donde se encuentra, utilizando el mismo residuo minero en la conformación.

De acuerdo con el estado del diseño actual del terraplén de cierre, es necesario analizar la porción frontal del terraplén denominada escudo (con ancho y talud aún por definir) en la cual el residuo minero deberá tener un alto porcentaje de compactación para mejorar sus propiedades mecánicas para tener factores de seguridad aceptables en los análisis de estabilidad de taludes (ver Fig 1). Detrás de ese escudo en el terraplén, el residuo minero podrá ser compactado a un menor porcentaje, en una sección que se denominará de transición (con ancho por definir). Finalmente, se tiene la zona más alejada del talud frontal del terraplén, donde los procedimientos de compactación podrán ser marginales, puesto que en el análisis de la estabilidad del terraplén se contará con el mayor aporte del escudo y la zona de transición. Así, el terraplén estará conformado por tres zonas distintivas ordenadas de mayor a menor resistencia y, por tanto, de mayor a menor compactación: escudo, transición y marginal.

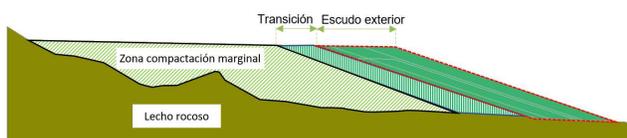


Figura 1. Esquema conceptual del terraplén de cierre.

2 MOTIVACIÓN

Para contar con el control de calidad de la compactación durante la conformación de las capas del terraplén de cierre, se cuenta principalmente con dos pruebas reconocidas: cono de arena, ASTM D1556-07, y densímetro nuclear, ASTM D6938.

El cono de arena es una prueba directa, que se realiza con un equipo sencillo, con personal no especializado, relativamente laboriosa y el resultado se obtiene después de calcular el contenido de agua del material excavado, lo que conlleva a tener resultados de densidad (y por tanto, porcentaje de compactación) al día siguiente. Ello condiciona su practicidad en campo para aprobar o rechazar el grado de compactación de la capa recién conformada, puesto que detiene el avance de la construcción.

Por otro lado, el densímetro nuclear es una prueba indirecta, que se realiza con un equipo de radiación nuclear, requiriendo personal especializado, y con un procedimiento de campo simple y breve, obteniendo el resultado de manera inmediata. Ello lo hace un método atractivo para determinar la aceptabilidad de la compactación de una capa trabajada, sin que implique un paro en la construcción.

Así, la motivación de este trabajo es verificar si existe una correlación entre las mediciones hechas con cono de arena (método directo, aunque no tan veloz) respecto a las mediciones hechas con densímetro nuclear (método indirecto, aunque veloz) para el residuo minero en cuestión. Estudiando esa correlación, y teniendo controles periódicos de verificación de que la correlación se siga cumpliendo en el tiempo, entonces se tendrían las ventajas de ambos métodos.

3 FUNCIONAMIENTO DEL DENSÍMETRO NUCLEAR Y EL CONO DE ARENA

El procedimiento del densímetro nuclear se encuentra en la norma ASTM D6938. El densímetro nuclear (ver Fig. 2) basa su funcionamiento en el conteo de radiación gama que logra pasar a través de los suelos de interés. La fuente de radiación de Cesio (en transmisión directa) es colocada al interior de una perforación previamente hecha en el suelo a ensayar, hasta una profundidad que puede ir de los 5 a los 30 cm. La fuente emite radiación gama y luego de pasar a través del suelo, el conteo es capturado por unos receptores llamados tubos Geiger-Mueller. Un suelo más denso absorbe más radiación, por lo que el conteo de radiación recibido es bajo; y al contrario, un suelo más suelto absorbe menos radiación, por lo que el conteo en los receptores será mayor.

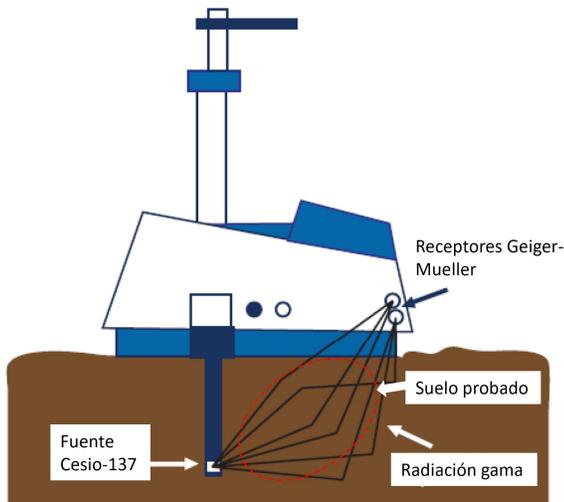


Figura 2. Esquema de densímetro nuclear haciendo medición en modo de transmisión directa (modificado de Bretreger 2015).

La prueba comienza con el hincado de una varilla guía en el sitio donde se colocará el densímetro, así como el aplanado del terreno para evitar efectos de rugosidad. Posteriormente, se coloca el densímetro en sitio, se baja la varilla que contiene la fuente de Cesio al interior de la perforación y, posterior a 1 minuto, se lee en el display el resultado del contenido de agua y la densidad seca del material. Para la medición de humedad, el densímetro utiliza el isopo Americio-241, a través de los átomos en el hidrógeno del agua del terreno.

Por su parte, el procedimiento de la prueba de compactación in situ de cono de arena está descrita en la norma ASTM D1556-07. La prueba se basa en hacer una excavación en el terreno de prueba, donde se comparará el peso seco del material excavado (después de ser secado en horno) respecto al volumen de la excavación, determinado mediante arena uniforme, de densidad conocida previamente. Así, se contará con la densidad seca del material y el contenido de agua, parámetros obtenidos directamente en sitio, por lo que la medición se considera directa.

4 RESULTADOS DE LAS MEDICIONES EN SITIO

4.1 Material de terraplén de cierre

El residuo minero que se usa para la construcción del terraplén es un subproducto resultado de la purificación y refinamiento del zinc. Previo a su depositación en el sitio, es estabilizado químicamente con cal, la cual controla su pH e incrementa su trabajabilidad, permitiendo su transporte en camiones. La cal se mezcla con el residuo minero previo a su salida de planta, mediante mezcladores mecánicos de paletas, y posteriormente, la mezcla se proporciona en tolvas a los camiones de volteo. Luego, en un trayecto de 2 km aproximadamente, el camión vierte la mezcla en el depósito, donde por medio de un tractor y subsecuentes pasadas de otros camiones, el material es marginalmente compactado.

Su clasificación SUCS corresponde a un limo de baja plasticidad ML, con un contenido de agua de 25%, contenido de finos 75%, densidad de 1.71 t/m³, índice de plasticidad 10% y densidad de sólidos 3.08. Aunque lo anterior es variable en función del proceso de planta, del contenido de cal añadido y del tratamiento mecánico que se dé al material durante su depositación.

4.2 Mediciones en terreno natural

A la par de su uso sobre el terraplén de cierre, el densímetro (modelo Instrotek CPN-MC) y el cono de arena fueron probados en 6 posiciones distintas en terreno natural cercano a las instalaciones del depósito minero, con la finalidad de identificar si existía una diferencia sustancial entre ambas técnicas, con mediciones paralelas en el mismo punto. Se utilizó terreno natural en la comparativa, para corroborar si la geoquímica del residuo minero podía afectar las mediciones indirectas del densímetro. Las mediciones en terreno natural arrojaron resultados de correlación cercanos a una relación 1:1 entre ambas técnicas, con un coeficiente de correlación R² de 0.99, como se aprecia en la Fig. 3.

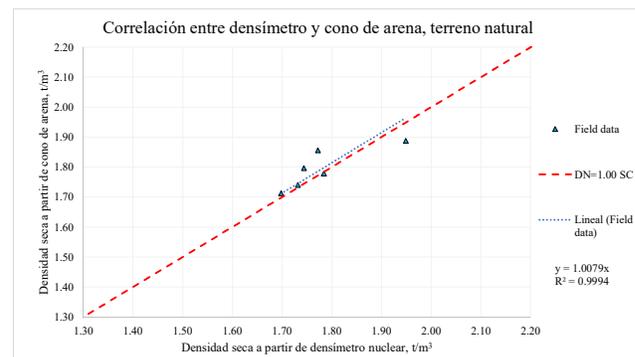


Figura 3. Resultados de medición de densidad seca en terreno natural con ambas técnicas.

4.3 Mediciones en el terraplén de cierre

Por su parte, en las mediciones sobre el residuo minero en el terraplén de cierre, se ejecutaron 142 pruebas de cono de arena y densímetro nuclear en el mismo sitio. Para obtener el contenido de agua en las pruebas de cono de

arena, y dado el tratamiento con cal, la temperatura de secado fue a 60°C en lugar de 110°C. La norma ASTM D2216 sugiere reducir la temperatura (a 60°C) para materiales donde presumiblemente se encuentre el mineral yeso (en material proveniente de rocas sedimentarias, como las calizas) o compuestos que tienen cantidades significativas de agua de hidratación, para evitar su deshidratación. En este sentido, la norma recomienda reducir la temperatura de secado a 60°C o bien, secar a temperatura ambiente en un desecador. Con esto, el tiempo de secado se incrementó, sin embargo, se evitó sobreestimar el contenido de agua. Al igual que en el secado a 110°C, se corroboraba que el agua había sido evaporada, comparando las masas de dos periodos consecutivos (1 h) sin diferencia significativa.

Las pruebas entre cono de arena y densímetro se ejecutaron a una distancia horizontal máxima de 3 m una de la otra. En la Fig. 4 se muestran los resultados obtenidos.

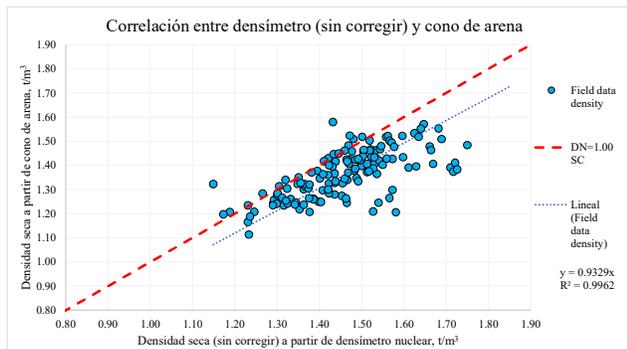


Figura 4. Resultados de medición en el residuo minero con ambas técnicas.

En general, en las mediciones hechas en el terraplén de cierre, la densidad obtenida del densímetro nuclear fue mayor. Haciendo una correlación lineal y considerando que la densidad obtenida con cono de arena es la más confiable (por ser medición directa), se tiene que la relación es de 0.93:1 (coeficiente de correlación R^2 0.99), lo cual quiere decir que, para el caso de este residuo minero de este depósito en particular, con esa composición química producto de la metalúrgica y con ese tratamiento con cal, al hacer mediciones con densímetro nuclear, basta multiplicar el valor de densidad seca por 0.93 para obtener la densidad seca “real”. En la Fig. 5 se muestran las lecturas de densímetro con el coeficiente de corrección aplicado.

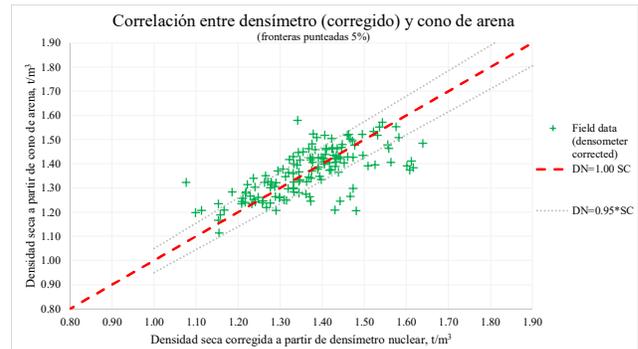


Figura 5. Resultados de medición de densidad seca en el residuo minero, incluyendo la corrección a las mediciones con densímetro.

En una primera instancia, los conos de arena fueron programados para realizarse en igual cantidad que los densímetros para poder establecer un coeficiente de correlación. Toda vez que se identificó esta correlación, entonces la frecuencia de medición con cono de arena disminuyó a sólo ser una prueba de control y verificación de la correlación.

El factor determinado con correlación lineal habilita la posibilidad de llevar el control diario de compactación con mediciones con densímetro nuclear, evitando con ello parar el avance de construcción. Sin embargo, dado que la planta metalúrgica puede ocasionalmente variar el proceso químico y/o alterar el contenido de cal añadido al residuo minero, entonces es necesario realizar también pruebas de compactación con regularidad para identificar ajustes en el contenido de agua y densidad objetivo para cumplir con el porcentaje de compactación de diseño.

Por su parte, también se graficaron los valores de contenido de agua obtenidos de las pruebas de cono de arena, respecto a los obtenidos con densímetro nuclear. En el procedimiento de cono de arena, el contenido de agua corresponde al procedimiento estándar de horno de convección (ASTM D2216), con la salvedad que el secado se hizo a 60°C debido al tratamiento con cal del residuo minero. Se observa una correlación muy cercana a 1:1, con un coeficiente de correlación R^2 de 0.99, lo cual indica que el densímetro nuclear puede usarse con confianza alta en este residuo minero para determinar el contenido de agua sin necesidad de multiplicar el resultado por algún coeficiente de ajuste. En la Fig. 6 se muestran los resultados.

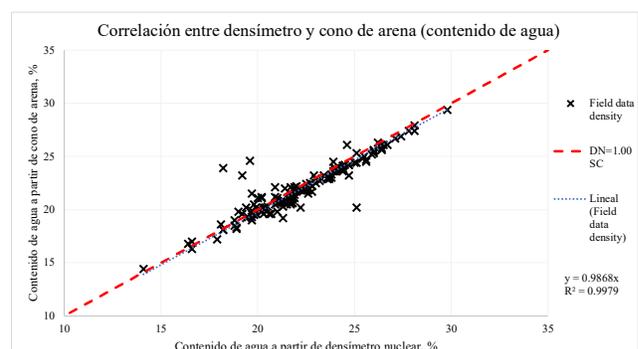


Figura 6. Resultados de medición de contenido de agua, medido con horno de convección a 60°C y con densímetro.

En la Tabla 1 se muestra un resumen de los factores de corrección obtenidos entre el densímetro nuclear y el cono de arena, para el residuo minero en cuestión y el terreno natural ensayado.

Tabla 1. Factor de corrección.

Variable por medir con densímetro	Factor de corrección para obtener valor real
Densidad seca en residuo minero	0.93
Contenido de agua en residuo minero	1.00
Densidad seca en terreno natural*	1.00
Contenido de agua en terreno natural*	1.00

*Terreno natural de la colindancia del depósito.

Con estos factores de correlación, es posible llevar un control de calidad de la compactación mediante densímetro nuclear, con mediciones periódicas tanto de cono de arena como de compactación al residuo minero. Con las pruebas periódicas de cono de arena, se monitorea que la correlación obtenida siga teniendo validez; con las pruebas recurrentes de compactación, se asegura un umbral de porcentaje de compactación del residuo que llega al depósito. Debido a los procesos de planta, dicho residuo no se envía siempre con la misma composición ni humedad, por lo que es necesario llevar el control de compactación de manera diaria, dos veces al día.

En la siguiente gráfica (Fig. 7) se muestra un ejemplo del control de compactación efectuado. Con el densímetro nuclear se monitorea la densidad seca del material depositado, así como el contenido de agua. Cuando la densidad rebasa un control mínimo requerido, entonces los supervisores de sitio del Propietario instruyen al contratista para modificar la humedad del terreno o bien, para incrementar la compactación marginal que se le da al material mediante pase de camiones y/o tractor. Actualmente, el porcentaje promedio de compactación ronda el 90% para la zona de compactación marginal, lo cual es aceptable para el diseño de cierre. Igualmente, gracias al manejo de estas gráficas, tanto los supervisores como el contratista tienen una herramienta para toma de decisión temprana en terreno.

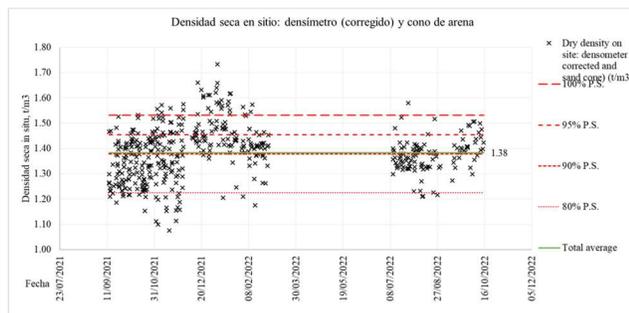


Figura 7. Gráfica de ejemplo del control de compactación llevado actualmente en sitio.

5 CONCLUSIONES

- Es posible hacer el control de compactación en el terraplén de cierre con densímetro nuclear multiplicando el valor de densidad seca por 0.93 para obtener la densidad seca real. Al tener el resultado de manera inmediata, esto permite no parar el avance en la construcción y liberar áreas compactadas o bien, tomar medidas correctivas para alcanzar el nivel de compactación de diseño.
- La correlación obtenida debe ser periódicamente reanalizada mediante pruebas de cono de arena. Esto para validar que efectivamente la correlación se mantiene.
- Debido a los cambios constantes en los procesos de planta y la dosificación de cal, es deseable ejecutar también con regularidad pruebas de compactación para ajustar los valores de densidad y contenido de agua objetivos para alcanzar la compactación de diseño.
- La discrepancia entre el cono de arena y densímetro nuclear puede deberse a una afectación de la geoquímica del residuo minero sobre las lecturas de transmisión directa del densímetro. Por ello, en caso de que planta modifique el tratamiento/formulación del residuo, se deberán programar verificaciones y pruebas con una frecuencia mayor para evaluar si la correlación aún es aplicable o se debe ajustar.
- El densímetro en sitio, además de servir como herramienta para determinar si un área cumple o no con los requisitos de compactación, también puede servir para identificar de inicio, si los camiones están llevando material con un contenido de agua que esté por debajo o por encima de un umbral tal, que requiera trabajo mecánico adicional para acercarlo al contenido de agua objetivo de compactación (p.e. extendido y desecación solar previo a compactación, etc.).

6 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Industrias Peñoles por permitir hacer uso de esta información para presentar este artículo. También, agradecen a la Ing. Mariela Beltrán y su equipo de supervisores por compartir expeditamente la información y tomar acciones en beneficio del proyecto en cuestión. Un agradecimiento en especial a la Ing. Estrella Martínez, Ing. Elizabeth Espino e Ing. Antonio Vizcarra.

7 REFERENCIAS

- Bretreger, A. (2015). Technical Guide L-G-002 Field density testing by using a nuclear density gauge. New South Wales Government, Australia.
- British Columbia Mine Waste Rock Pile Research Committee (1991). Mined rock and overburden piles. Investigation and design manual, interim guidelines.