



Revista de la Construcción

ISSN: 0717-7925

revistadelaconstruccion@uc.cl

Pontificia Universidad Católica de Chile  
Chile

Villavicencio, G.; Breul, P.; Espinace, R.; Valenzuela, P.  
Control de compactación con penetrómetro ligero en tranques de relaves, considerando su  
variabilidad material y estructural  
Revista de la Construcción, vol. 11, núm. 1, abril, 2012, pp. 119-133  
Pontificia Universidad Católica de Chile  
Santiago, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127623090011>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica  
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

*Tailings dams compaction  
control with light  
penetrometer, considering  
material and structural  
variability*

# Control de compactación con penetrómetro ligero en tranques de relaves, considerando su variabilidad material y estructural



## **Autores**

VILLAVICENCIO, G. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso,  
gabriel.villavicencio.a@exa.pucv.cl  
Valparaíso, Chile

BREUL, P. Université Blaise Pascal. Clermont II,  
pierre.breul@polytech.univ-bpclermont.fr

ESPINACE, R. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.  
respinac@ucv.cl  
Valparaíso, Chile

VALENZUELA, P. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso,  
pamela.valenzuela@ucv.cl  
Valparaíso, Chile

**Fecha de recepción** 11/08/2011

**Fecha de aceptación** 23/11/2011

## Resumen

En el Volumen 6 N° 2 del año 2007 de esta Revista, se presentó un artículo con los resultados de las primeras investigaciones realizadas en Chile, sobre la aplicación del nuevo penetrómetro PANDA (Pénétromètre Autonome Numérique Dynamique Assisté) para el control de compactación en tranques de arenas de relave de la minería del cobre en Chile. Se destacaban sus ventajas económicas y la rapidez de ejecución del ensayo, lo que abría nuevas perspectivas para estudiar la variabilidad de las propiedades geotécnicas de este tipo de materiales.

En este artículo se presenta la nueva metodología para realizar el control de

compactación en tranques de arenas de relaves, ya consolidada, empleando el penetrómetro PANDA. El empleo de este tipo de herramientas no solo permite determinar in situ el grado de compactación y el espesor de las capas depositadas, sino que además la variabilidad tanto material como estructural que se genera en este tipo de depósitos. Todos estos factores son clave para reducir el riesgo de inestabilidad mecánica, específicamente ante el riesgo de licuefacción sísmicamente inducida e inestabilidad de taludes. Ambos son los mecanismos de falla más frecuentemente observados en países con una alta actividad sísmica como es Chile.

**Palabras clave:** Tranques de relave, control de compactación, penetrómetros dinámicos de cono.

## Abstract

*In Volume 6 N°2 (2007) of this Journal, an article on the results of studies carried out in Chile on the use of a new PANDA penetrometer (Pénétromètre Autonome Numérique Dynamique Assisté) for controlling compaction at different tailings dams of the copper mining industry in Chile was presented. In the article, the economic advantages and ease of operation were emphasized, which consequently provides new perspectives on the variability of geotechnical properties of such materials.*

*In this article, a new methodology for the compaction control of tailing dams using the PANDA penetrometer is presented, which considers both the material and structural variability of these deposits. The use of this tool allows determination in situ of the compaction state and the deposited layer thickness, which are key factors for the evaluation of the mechanical instability risk. This is especially important for the seismically induced liquefaction phenomenon and slope instability, which represents the most common fault mechanisms observed in highly seismic countries, such as Chile.*

**Keywords:** Tailings dams, compaction control, dynamics cone penetrometers.

## 1. Introducción

Los tranques de arenas de relave muchas veces presentan un elevado riesgo de su estabilidad mecánica, la que se debe a causas como diseños incompletos, inadecuada construcción y/o un insuficiente control de operación, pudiendo conducir a incidentes de diversa magnitud, importantes daños ambientales, pérdidas económicas significativas y muertes. A nivel mundial, dentro el período comprendido entre los años 1915 y 2010, se han registrados del orden de 286 casos de incidentes de depósitos mineros. (Rico *et al.* 2008), (Wise Uranium Project, 2009), (MCH, 2010). Del total de incidentes reportados, un 41% (116 casos) se produjeron en tranques de arenas de relave.

En Chile desde principios del siglo XX han sido reportados alrededor de 40 casos de inestabilidad mecánica, generados producto del fenómeno de la licuefacción, inestabilidad de taludes y deformaciones sísmicamente inducidas. En algunos casos estas fallas han ocasionado pérdidas humanas, económicas y han provocado grandes daños al medio ambiente. Algunos ejemplos lo constituyen las fallas de tranques de arenas de relave generadas producto de los sismos de los años 1928, 1965, 1985, 1997 y 2010, que afectaron las zonas norte, centro y centro-sur de Chile. Troncoso (2002), Carvajal y Pacheco (2004), Engels y Dixon (2010), MCH (2010).

Si bien actualmente los avances de la práctica ingenieril y el marco normativo chileno han permitido el desarrollo de proyectos de tranques de relaves de alturas del orden de 250 (m), existe aún una serie de vacíos legales específicamente en relación al control de compactación que debe ser realizado durante la etapa operacional de estos depósitos. En efecto, actualmente solo se controla el grado de compactación a nivel superficial, considerando un número reducido de puntos definidos a "juicio ingenieril", sin considerar dos aspectos fundamentales: el espesor de capa depositado y la variabilidad que presentan las arenas de relaves. Ello podría conducir a generar zonas de débil resistencia al interior del muro resistente de un tranque de relaves y por consecuencia un inadecuado comportamiento mecánico conducente a fallas o colapsos estructurales.

El objetivo de este artículo es presentar la nueva metodología, ya empleada en depósitos chilenos, para realizar el control de compactación en la fase operacional de tranques de relave, mediante el empleo del penetrómetro dinámico ligero PANDA. Esta herramienta permite controlar de manera económica, rápida y eficaz, tanto el grado de compactación y como el espesor de capa depositado, considerando la variabilidad material

de las arenas de relaves y la variabilidad producto del proceso de construcción empleado.

## 2. El control de la depositación de las arenas de relave

Según la nueva legislación chilena vigente (Decreto Supremo N° 248. Of. 2007) y los criterios de ingeniería chilena (Barrera y Campaña, 2004), dentro de los factores clave para reducir o impedir la generación de la licuefacción del muro resistente de un tranque de relave, se encuentra el control de depositación de las arenas de relave, en relación a la distribución granulométrica y al grado de compactación.

### a) Distribución granulométrica:

El Decreto aludido recomienda para la construcción del muro resistente, depositar arenas con un porcentaje de finos no mayor a un 20%, y la práctica ingenieril, entre el 10% y el 25%, compatibilizando aspectos relacionados con las propiedades geotécnicas de los materiales y con los costos asociados al proceso de cicloneo.

### b) Grado de compactación:

Aunque la normativa no lo establece, la práctica ingenieril considera como aceptable un grado de compactación igual o superior al 95% OPN (Óptimo Proctor Normal), en estructuras o rellenos donde es posible aceptar cierto nivel de deformaciones, como es el caso de tranques de relave. Investigaciones realizadas por Verdugo (1997), demostraron que para arenas de relave, con un porcentaje de finos ( $< 80 \mu\text{m}$ ) comprendido entre un 10% y un 25%, un grado de compactación de 95% OPN es equivalente a una densidad relativa (DR) del orden de un 60% a un 65%. Para este tipo de materiales un grado de compactación de 95% OPN o 60% de DR, corresponde al límite que define un comportamiento mecánico del tipo dilatante o contractivo (Troncoso, 1986).

### c) Exigencias asociadas:

En las exigencias establecidas en el DS N° 248. Of. 2007, para la depositación de las arenas de relave, se definen los siguientes puntos:

- Arenas con porcentaje de finos ( $80 \mu\text{m}$ ) inferior a 20%,
- El grado de compactación debe ser referido a los ensayos Proctor Normal o Modificado, sin especificar expresamente el valor mínimo requerido,

- Se establece la entrega de informes de control de compactación de manera trimestral.

Sin embargo, actualmente no existen metodologías estandarizadas que permitan mejorar el proceso de control, ni herramientas que permitan evaluar dos de los aspectos fundamentales para la estabilidad mecánica de este tipo de estructuras, correspondientes al grado de compactación y al espesor de la capa compactado.

Otro importante aspecto asociado, no considerado en el control de compactación in situ, es la variabilidad de las arenas de relave depositadas. La práctica actual considera tomar como referencia una a dos muestras patrón, bajo la hipótesis de homogeneidad del material. Ello se traduce en la generación de una incertidumbre, en relación a los resultados de los controles de compactación realizados y por consecuencia en el real comportamiento mecánico que presentará este tipo de depósitos.

### 3. Variabilidad y clasificación de las arenas de relave

#### 3.1 Tipos de variabilidad y cuantificación

Actualmente es posible identificar dos tipos de variabilidad en las arenas de relaves; una del tipo material, asociada con las propiedades índice de estos materiales y otra del tipo estructural relacionada con el proceso de construcción empleado (Villavicencio, 2009).

- La variabilidad material:* se asocia con el origen mineralógico y la "fabricación" de las arenas de relave (molienda, flotación, cicloneo y deposición), lo que se traduce en variación de la densidad de sus partículas sólidas, granulometría y plasticidad de las partículas finas ( $< 80 \mu\text{m}$ ).
- La variabilidad estructural:* se relaciona al proceso empleado para la construcción y compactación (grado de compactación y espesor de capa compactado).

Para ambos casos es posible considerar dos escalas de análisis: espacial y temporal. La variabilidad a escala espacial se asocia con la dispersión de las características geotécnicas de las arenas de relave y de la estructura en el espacio. A la escala temporal la variabilidad se relaciona fundamentalmente con el efecto de envejecimiento que presenta este tipo de materiales, generado por la cementación de las partículas, cambios

en el estado hídrico y otros factores (Troncoso, 1986) (Troncoso y Garcés 2000).

Investigaciones realizadas por Villavicencio *et al.* (2010) en tres tranques de arenas de relave (Tabla 1), permitieron estimar la variabilidad de las propiedades índice y de resistencia a la penetración in situ en las arenas. Los resultados indican en una primera instancia que las arenas de relave, considerando la distribución granulométrica y la naturaleza de la fracción fina, pueden ser clasificadas dentro de una gran familia de materiales, correspondientes a arenas limosas del tipo SM. Sin embargo, los rangos de variación del porcentaje de finos ( $< 80 \mu\text{m}$ ), como resultado del modo de "fabricación", y de la densidad de las partículas sólidas ( $\gamma_s$ ), relacionada con el origen mineralógico de los relaves, influyen directamente en los parámetros de estado, como la densidad Proctor ( $\gamma_{d\text{max}}$ ). Esta variabilidad a la escala espacial, del tipo material, se genera inclusive dentro de un mismo tranque de arenas de relave.

La variabilidad estructural a escala espacial, se genera producto del proceso empleado en la construcción de estos depósitos, lo que queda en evidencia a partir de variación de la resistencia de punta ( $q_{d,i}$ ), tanto en superficie como en profundidad. Estos reflejan dos importantes factores: el estado la estructura intercapa y la variabilidad inherente al proceso de compactación (eficiencia de la maquinaria y homogeneidad de la energía de compactación). Otro aspecto relacionado con la variación de la resistencia a la penetración, corresponde a la variación del estado hídrico que se genera en este tipo de materiales, factor que se asocia con la variabilidad a la escala temporal.

Para realizar procesos de control de compactación de tranques de relave, insertando la variabilidad material y estructural (escala espacial y temporal), es posible relacionar las características físicas de los materiales, con una respuesta mecánica y un estado hídrico en particular. Ello a partir de la clasificación de las arenas desde fundamentos de micromecánica de medios granulares (Biarez, 1977; Favre, 1980; Cambou, 1987), empleando penetómetros dinámicos como herramientas de control de compactación.

#### 3.2 Identificación de clases de arenas de relave

La información para clasificar las arenas de relave, se ha generado de la recopilación de datos provenientes del control de compactación, realizado en varios tranques de relave representativos de la minería del cobre chilena. Así, a partir del análisis estadístico de la información recopilada, se ha identificado seis clases (Tabla 2).

**Tabla 1.** Propiedades geotécnicas de arenas de relave. Villavicencio et al. (2010)

Propiedades Geotécnicas	Datos bibliográficos	Datos experimentales								
		Tranque N° 1			Tranque N° 2			Tranque N° 3		
	Rango	Datos	Media	CV (%)	Datos	Media	CV (%)	Datos	Media	CV (%)
$\gamma_s$ (grs/cm <sup>3</sup> )	2,68-3,88	108	3,09	4,6	45	3,36	8,02	40	3,07	2,2
$D_{max}$ (mm)	0,60-2,00	3266	0,721	27,3	262	0,285	82,2	2958	1,831	42,4
$D_{50}$ (mm)	0,05-0,25	3266	0,127	19,0	262	0,111	15,2	2958	0,251	8,7
Finos < 80 $\mu$ m (%)	12-25	3266	28,0	28,7	262	33	26,3	2958	17	10,0
IP (%)	0	12	0	0	8	0	0	12	0	0
$\gamma_{dmax}$ (grs/cm <sup>3</sup> )	1,50-2,20	392	1,82	6,2	262	2,08	8,0	495	1,85	2,3
$w_{op}$ (%)	–	392	15,2	9,4	262	14,4	10,3	495	14,3	6,2
$\gamma_d$ (grs/cm <sup>3</sup> )	1,58-1,70	3266	1,75	6,6	275	2,01	8,2	2958	1,81	2,9
$w_{nat}$ (%)	7,0-13,0	3266	11,0	22,3	275	3,3	43,1	2958	7,5	27,3
$\gamma_h$ (grs/cm <sup>3</sup> )	1,69-1,84	3266	1,94	6,7	275	2,07	8,2	2958	1,95	3,5
qd (Mpa)	–	275	4,80	50,6	75	2,87	45,9	100	1,95	52,8

Fuente:  $\gamma_s$ : densidad de las partículas sólidas,  $D_{max}$ : diámetro máximo de las partículas,  $D_{50}$ : diámetro medio de las partículas,  $\gamma_{dmax}$ : densidad máxima compactada seca,  $w_{op}$ : humedad óptima,  $\gamma_d$ : densidad seca in situ,  $w_{nat}$ : humedad natural,  $\gamma_h$ : densidad in situ, qd: resistencia de punta, CV (%): coeficiente de variación.

**Tabla 2.** Clase de arenas de relave según sus propiedades índice y parámetros de estado asociados

Clase	$D_{50}$ (mm)		Porcentaje de finos (%)		$\gamma_s$ (ton/m <sup>3</sup> )		$\gamma_{dmax}$ (ton/m <sup>3</sup> )		$w_{op}$ (%)	
	Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)
1	0,127	19,0	28	28,7	3,09	4,6	1,82	6,2	15,97	9,4
2	0,111	15,2	33	26,3	3,36	8,0	2,08	8,1	14,4	10,3
3	0,251	8,7	17	9,75	2,86	2,4	1,85	2,3	14,3	6,1
4	0,173	17,3	27	19,4	3,07	2,2	1,82	5,1	15,6	5,5
5	0,296	7,8	13	18,3	2,70	1,5	1,82	5,1	11,1	14,5
6	0,324	32,2	16	8,7	2,69	0,9	1,67	1,0	17,8	3,9

## 4. Control de compactación con penetrómetro dinámico

### 4.1 Principio teórico

El principio teórico para el control de compactación con penetrómetro dinámico se fundamenta en la relación que existe entre la resistencia de punta ( $q_d$ ) y la densidad seca ( $\gamma_d$ ) de suelo, a partir de la descripción de su microestructura basada en hipótesis derivadas de la micromecánica de medios granulares (Biarez (1977), Favre (1980), Cambou (1987)). Si el parámetro a medir in situ es la resistencia a la penetración, bajo la hipótesis de reversibilidad (granos irrompibles, resistentes al desgaste y reversibilidad de la succión) y conociendo los parámetros de naturaleza e interacción, es posible determinar in situ la densidad seca ( $\gamma_d$ ) en profundidad del material. Investigaciones realizadas por Chaigneau (2001) permiten establecer la relación con  $q_d$  (Ecuación 1).

$$\gamma_d = \alpha_A \cdot \ln(q_d) + \beta_B$$

Donde  $\alpha_A$  y  $\beta_B$  son valores que dependen del tipo y el estado hídrico del suelo.

Los trabajos realizados por Salgado *et al.* (1997) y Rahim *et al.* (2004), demostraron de manera experimental y analítica (teoría de expansión de cavidad), que en suelos granulares es posible estimar la densidad seca in situ (índice de vacíos) a partir de la resistencia de punta obtenida desde ensayos de penetración dinámicos.

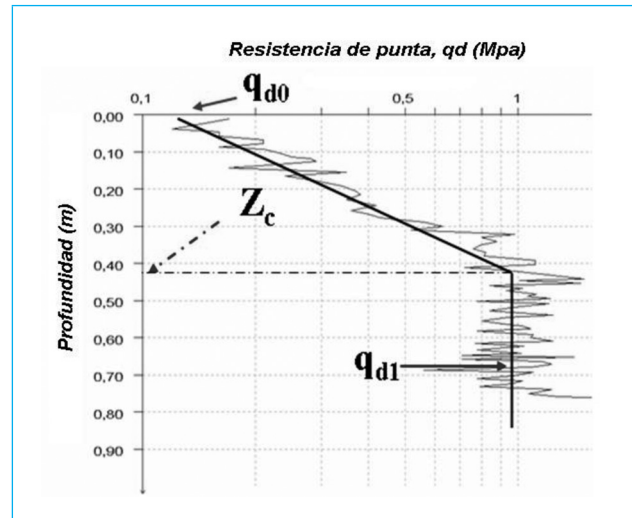
### 4.2 Fundamento

Gourvés *et al.* (1995; 1997) demostraron que el penetrograma resultante de un ensayo de penetración realizado en un medio granular homogéneo, de densidad y contenido de agua constante, puede ser esquematizado en el espacio  $\log(q_d)$ - $z$  a partir de dos rectas que definen tres parámetros característicos: la resistencia de punta a nivel superficial ( $q_{d0}$ ), la profundidad crítica ( $z_c$ ) más allá de la cual la resistencia de punta es constante y la resistencia de punta constante ( $q_{d1}$ ), como es presentado en la Figura 1.

## 5. Control de compactación mediante el penetrómetro ligero PANDA

Para realizar el control de compactación en tranques de relave, determinando el grado de compactación y el espesor final de capa compactado y considerando la variabilidad que presenta in situ este tipo de materiales,

**Figura 1.** Señal penetrométrica esquematizada y parámetros característicos ( $q_{d0}$ ,  $z_c$  y  $q_{d1}$ ). (Chaigneau, 2001)



una alternativa posible de emplear es el penetrómetro dinámico ligero PANDA (Pénétromètre Autonome Numérique Dynamique Assisté). Comparado con las herramientas habitualmente empleadas para el control de compactación (método cono de arena y densímetro nuclear), el penetrómetro PANDA presenta una serie de ventajas, tales como: rapidez en la ejecución del ensayo, fácil repetitividad, versatilidad del equipo, fiabilidad de los resultados obtenidos, sustentabilidad ambiental, bajos costos y facilidad de transporte lo que permite analizar lugares de difícil acceso como los taludes de tranques de relaves. (Espinace *et al.* 2007)

### 5.1 Equipo, funcionamiento y principio de control

El equipo PANDA es un penetrómetro dinámico ligero a energía variable cuyo principio básico de funcionamiento consiste en hincar en el suelo, mediante el impacto de un martillo de masa estándar (2,0 kg), un tren de barras de 14,0 (mm) de diámetro provisto en su extremo de punta cónica metálica de 2,0 (cm<sup>2</sup>) de diámetro.

El impacto de martillo genera una onda de esfuerzo en la cabeza de golpeo, la cual se propaga hacia la punta del penetrómetro generando la penetración. Para cada golpe de martillo es registrada de manera continua la penetración alcanzada ( $e$ ) y la resistencia de punta del suelo ( $q_d$ ), se obtiene con la adaptación de la fórmula Holandesa (Ecuación 2).

$$q_d = \frac{1}{A_c} x \frac{E}{e} x \frac{M}{M + P}$$



Donde  $M$  es la masa del martillo empleado,  $E$  la energía aplicada,  $e$  la penetración de la punta en el suelo por cada golpe de martillo,  $A_c$  es el área de la punta y  $P$  la masa del tren de barras y de la cabeza de golpe. Una vez finalizado el ensayo, es posible observar de manera inmediata la señal penetrométrica resultante y las capas de suelo detectadas, en términos de la resistencia  $q_d$ . La profundidad máxima de penetración en modalidades control de compactación es del orden de 1.5 (m). Los valores máximos para la resistencia de punta  $q_d$  varían entre 20.0 a 30.0 (Mpa). (Gourvès y Richard 1995; Gourvès y Zhou 1997; Benz, 2009).

En líneas generales, el principio de control de compactación con el empleo del penetrómetro PANDA se basa en la comparación de la señal penetrométrica obtenida in situ, con una curva obtenida previa calibración en laboratorio o in situ del material a controlar, considerando un grado de compactación y un estado hídrico en particular.

## 5.2 Metodologías de calibración

El fundamento teórico desarrollado para el realizar el control de compactación con este penetrómetro, junto a la correlación entre la resistencia de punta ( $q_d$ ) y la densidad seca ( $\gamma_d$ ), dieron origen a una serie de investigaciones para generar metodologías de calibración in situ y en laboratorio.

Con el objetivo de obtener curvas de control de diferentes tipos de suelos y arenas de relaves, considerando la variación de sus características físicas (granulometría), el gradiente de densidad al interior de una capa compactada (efecto de fondo de capa), el estado hídrico in situ al momento de realizar el control, se investigó con el grado de compactación habitualmente empleado para la construcción de obras en suelo o materiales análogos. (Chaigneau, 2001; Benz y Cancino, 2005; Villavicencio, 2009).

### 5.2.1 Calibración en laboratorio

La metodología general para la obtención de las curvas de control de compactación en laboratorio, se fundamenta en la obtención de los parámetros característicos de un penetrograma obtenido en un medio granular homogéneo, correspondientes a  $q_{d0}$ ,  $z_c$  y  $q_{d1}$ , obtenidos para una humedad y un estado de compactación especificado (Chaigneau, 2001; Benz y Cancino, 2005). Para una serie de tres ensayos PANDA realizados al interior de un molde de calibración, se calculó el valor promedio de cada parámetro ( $q_{d0}$ ,  $q_{d1}$  y  $z_c$ ), considerando un estado hídrico en particular (seco, medio o húmedo) y cinco niveles de compactación referidos al valor Proctor (85%, 90%, 95%,

100%, 110%), como se presenta en las Figuras 2a, 2b y 3. La variación de cada parámetro se describe mediante una función tipo logarítmica, confirmando los resultados obtenidos por Chaigneau (2001).

Para un valor de densidad seca ( $\gamma_d$ ), asociada a un grado de compactación (OPN%, OPM%) y a un estado hídrico particular, se obtienen los parámetros  $q_{d0}$ ,  $q_{d1}$  y  $z_c$ , que definen la curva de control de compactación. En la Tabla 3, se presentan los resultados de la calibración realizada en arenas de relave clases 1 y 3, según clasificación propuesta.

Un ejemplo de la curva de control de compactación obtenida de la metodología de calibración en laboratorio, es presentado en el Gráfico 1.

Las curvas propuestas, obtenidas en condiciones controladas de laboratorio, permiten realizar el control de compactación en tranques de relaves homogéneos, principalmente en relación al grado de compactación y estado hídrico in situ que presentan los materiales al momento de realizar el control. Sin embargo, una serie de experiencias desarrolladas por los autores en diferentes tranques de arenas de relaves en operación, han demostrado que la variabilidad generada in situ por ambos factores produce una importante variación en la resistencia de punta ( $q_d$ ).

### 5.2.2 Influencia del grado de compactación y su humedad en la resistencia $q_d$

Con el objetivo de analizar la influencia del grado de compactación y su humedad en la resistencia de punta ( $q_d$ ) de arenas de relaves, han sido construidas en laboratorio una serie de probetas en moldes de calibración. Los materiales empleados han sido compactados considerando cuatro grados de compactación referidos al valor OPN (Optimo Proctor Normal) y considerando tres estados hídricos definidos en función de la humedad óptima de compactación del material ( $W_{op}$ ), presentados en la Tabla 4.

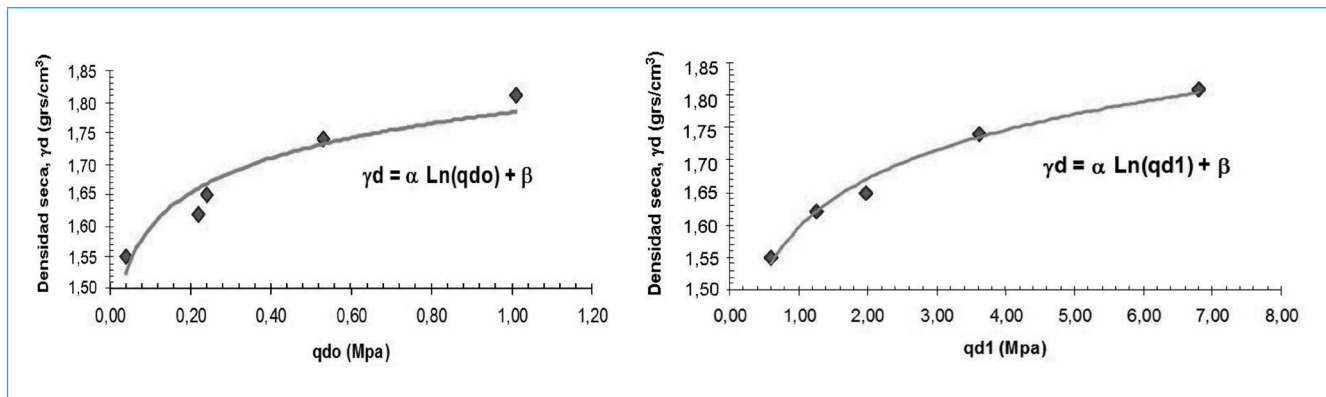
Los resultados obtenidos de los análisis realizados, presentados en el Gráfico 2, permiten concluir:

- La resistencia de punta ( $q_d$ ) en arenas de relave es sensible al estado hídrico y a la humedad in situ.
- Para un mismo grado de compactación y diferentes estados hídricos, en arenas de relave se obtienen diferentes valores de resistencia de punta ( $q_d$ ).

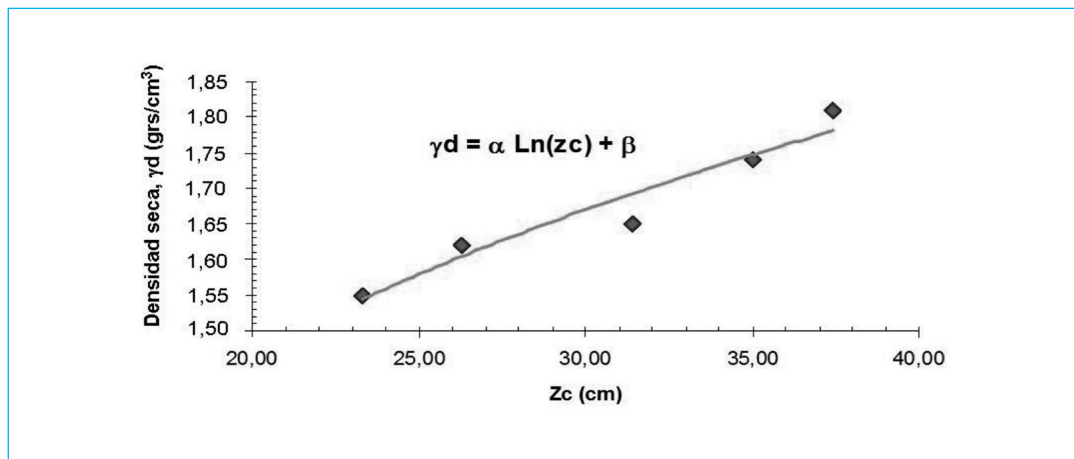
Estos dos aspectos son fundamentales para realizar el control de compactación mediante el penetrómetro PANDA. En efecto, durante la fase de construcción



**Figura 2.** a) Relación entre la resistencia de punta y la densidad seca ( $\gamma_d$ ). a) Resistencia de punta superficial ( $q_{d0}$ ). b) Resistencia de punta constante ( $q_{d1}$ ).



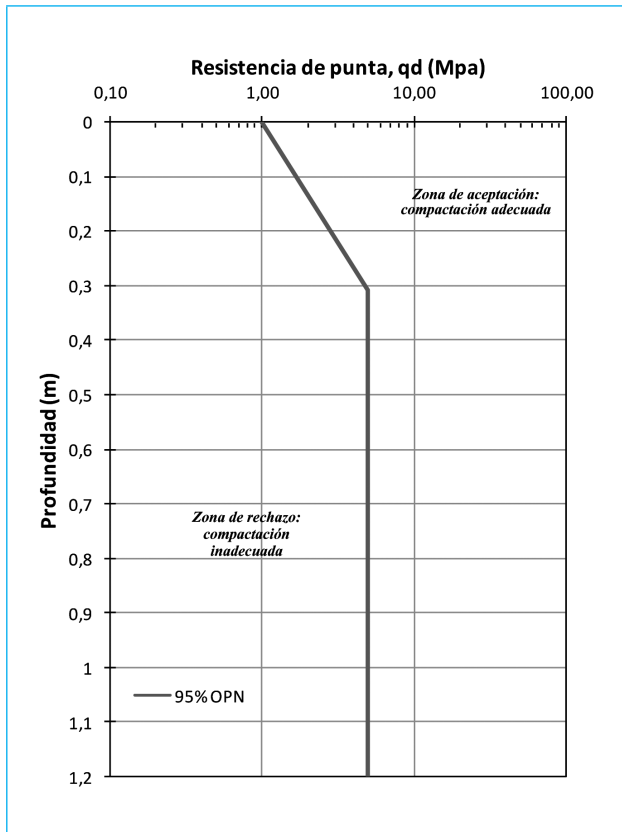
**Figura 3.** Relación entre la profundidad crítica ( $z_c$ ) y la densidad seca ( $\gamma_d$ )



**Tabla 3.** Parámetros penetrométricos curva de calibración de laboratorio. Arenas de relaves clases 1 y 3

Clase	Parámetros de compactación		Curva de control de compactación		
	OPN (%)	Wop (%)	$q_{d0}$ (Mpa)	$q_{d1}$ (Mpa)	$z_c$ (cm)
1	95	14,5	0,99	4,98	0,31
3	95	13,4	0,47	9,40	0,46

**Gráfico 1.** Curva de control de compactación. Calibración en laboratorio. Grado de compactación: 95% OPN, humedad óptima: 14,5%. Arena de relaves clase 1

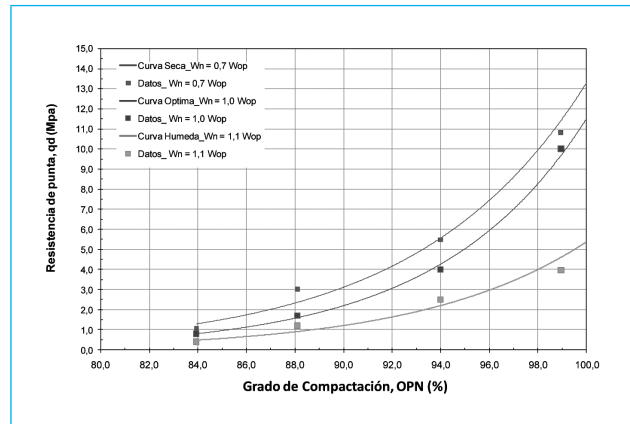


**Tabla 4.** Clasificación del estado hídrico en función de la relación entre la humedad natural y la humedad óptima de compactación

Estado hídrico	Rango
Seco	$1,10 \text{ Wop} \leq \text{Wnat} < 1,25$
Medio	$0,90 \text{ Wop} \leq \text{Wnat} < 1,10$
Húmedo	$0,60 \text{ Wop} \leq \text{Wnat} < 0,90$

de tranques de arenas de relave, los controles de compactación normalmente son realizados en capas con diferentes “edades” de depositación. Por lo tanto, las curvas de control de compactación a emplear, deben considerar como dato el estado hídrico que

**Gráfico 2.** Variación de la resistencia de punta (qd) en función del grado de compactación Proctor Normal (OPN) y del estado hídrico. Resultados de laboratorio



presentarán las arenas de relave al momento de su control in situ.

En respuesta a lo anterior, con el objetivo de considerar en el proceso de control de compactación de tranques de arena de relaves, la variabilidad material, la variabilidad del grado de compactación y del estado hídrico, investigaciones desarrolladas por Villavicencio (2009) permitieron generar una metodología de calibración in situ.

### 5.2.3 Calibración in situ

El principio de calibración in situ se basa en la obtención de una curva de control de compactación PANDA, para un tipo de material específico, una humedad y grado de compactación in situ previamente definido (en función del número de pasadas y espesor de capa). Para tal efecto son construidas canchas de calibración, cuyas dimensiones son definidas en función de la maquinaria empleada para el proceso de compactación y de la superficie de descarga de las arenas de relave cicloneadas.

Según las dimensiones de la cancha de calibración construida, en el eje longitudinal se definen al menos 5 puntos de control geotécnico donde son realizados ensayos PANDA, cono de arena (ensayo de referencia para el control de compactación en tranques de relave) y extraen muestras para su posterior caracterización en laboratorio, mediante ensayos Proctor, granulometrías y densidad de las partículas sólidas. El proceso de calibración es nuevamente realizado si las características físicas de las arenas de relave varían y/o si es cambiada la maquinaria de compactación.

La Tabla 5, muestra las características físicas de las arenas de relave empleadas, en conjunto con el estado hídrico que presentaron las canchas de calibración construidas.

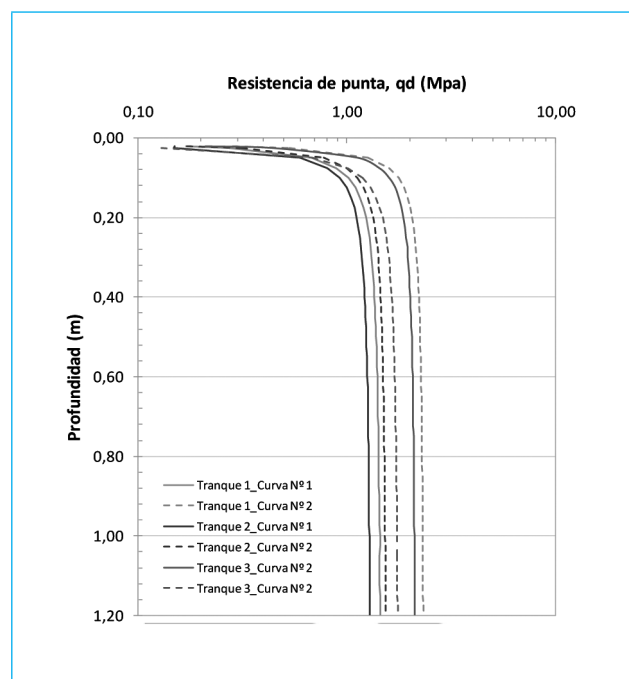
Los penetrogramas obtenidos se tratan matemáticamente, con el objetivo de eliminar el ruido de fondo de la señal obtenida. Mediante un análisis de regresión

simple es obtenida la curva de control asociada con las arenas de relave, su humedad in situ, su grado de compactación asociado y con el espesor de capa depositado. En el Gráfico 3 se presentan las curvas de control de compactación obtenidas en tres tranques de arenas de relaves, mediante la metodología de calibración in situ.

**Tablas 5.** Características físicas de arenas de relaves. Estado hídrico de las canchas de calibración in situ

Tranque	Curva	% de finos		D <sub>50</sub> (mm)		Gs		%W <sub>nat</sub>		%W <sub>op</sub>	Estado hídrico
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.		
1	Nº 1	20	38	0,111	0,16	2,96	3,28	6,1	14,8	13,9	Seco
	Nº 2	21	50	0,08	0,143	3,05	3,33	6,9	16,3	15,9	Seco
2	Nº 1	18	26	0,160	0,305	2,86	2,99	4,4	8,8	15,3	Muy seco
	Nº 2	24	32	0,133	0,185	2,78	2,94	3,1	9,9	16	Muy seco
3	Nº 1	23	40	0,133	0,215	2,98	3,29	5,0	9,9	13,3	Muy seco
	Nº 2	22	38	0,122	0,196	2,99	3,12	3,5	8,4	14,5	Muy seco

**Gráfico 3.** Curvas de control de compactación. Calibración in situ. Grado de compactación igual a un 95% OPN



### 5.3 Validación del control de compactación mediante el ensayo PANDA

Los resultados obtenidos de una serie de investigaciones realizadas en diversos tranques de arenas de relave chilenos (Benz et al. 2005, Espinace et al. 2007, Villavicencio, 2009), indican que el factor de correlación entre la densidad seca obtenida con el ensayo de penetración PANDA ( $\gamma_{dPANDA}$ ) y la densidad seca obtenida empleando el método del cono de arena ( $\gamma_{dCONO}$ ), es cercano a la unidad ( $C \approx 1$ ), como es presentado en la Tabla 6.

## 6. Caso de aplicación

### 6.1 Control de compactación superficial

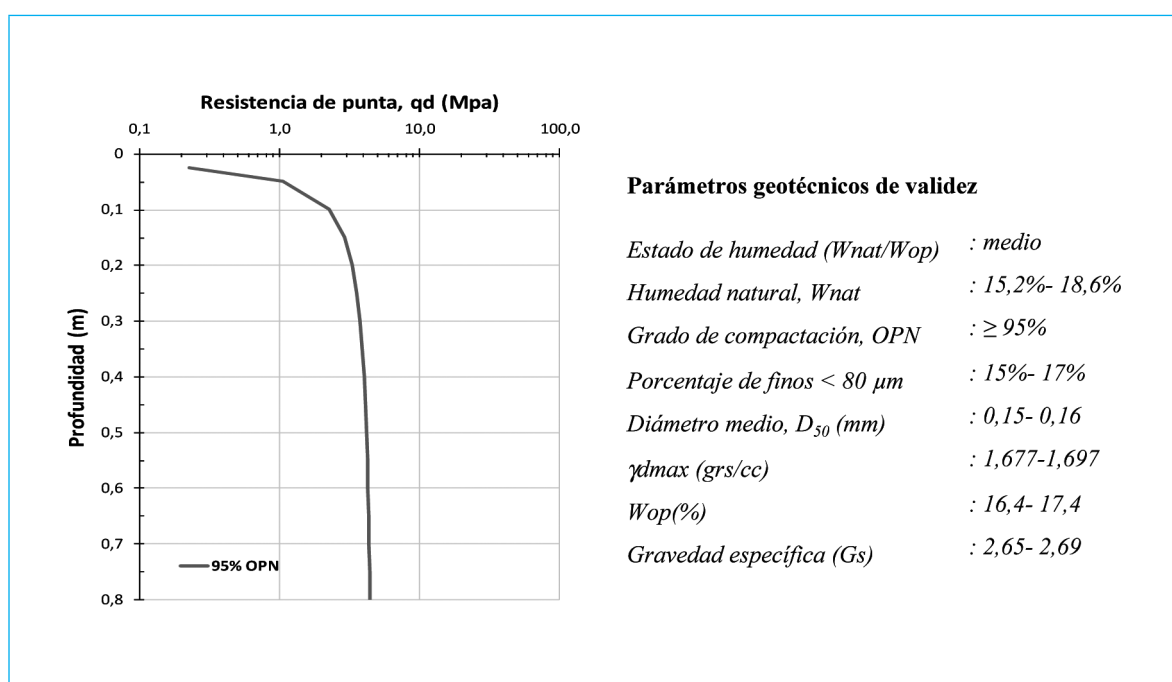
Se presenta un caso de aplicación de control de compactación con el penetrómetro PANDA en un tranque de relave de la gran minería del cobre. La curva de control, del Gráfico 4, se obtuvo de la metodología de calibración in situ anteriormente descrita.

En el tranque experimental fueron definidos dos sectores (1 y 2), donde fueron realizados una serie de

**Tabla 6.** Correlación entre resultados ensayo PANDA y cono de arena

Sector Muro tranque	Cono de arena	PANDA		Proctor Normal	OPN (%)		Factor C
	$\gamma_d$ (gr/cc)	$\gamma_d$ (gr/cc)	qd (Mpa)	$\gamma_{d_{\max}}$ (gr/cc)	Cono de arena	PANDA	
Coronamiento	1.827	1.821	1.609	1.851	99	98	0.989
Medio talud	1.803	1.804	1.283	1.851	97	96	0.989
Pie de talud	1.829	1.828	1.735	1.851	99	99	1.000

**Gráfico 4.** Curva de control de compactación para el empleo del penetrómetro PANDA



ensayos de cono de arena para la determinación del grado de compactación in situ de las arenas de relave depositadas, referido a la densidad máxima compactada seca (Proctor Normal). En la Tabla 7 se presentan los resultados obtenidos del análisis estadístico de los datos obtenidos en cada punto de ensayo.

El sector 1 fue compactado al 91 % OPN, determinado a partir del método del cono de arena. Los penetrógramas obtenidos de los ensayos PANDA, se encuentran a la izquierda de la curva de control de compactación propuesta, es decir en la zona de rechazo que clasifica

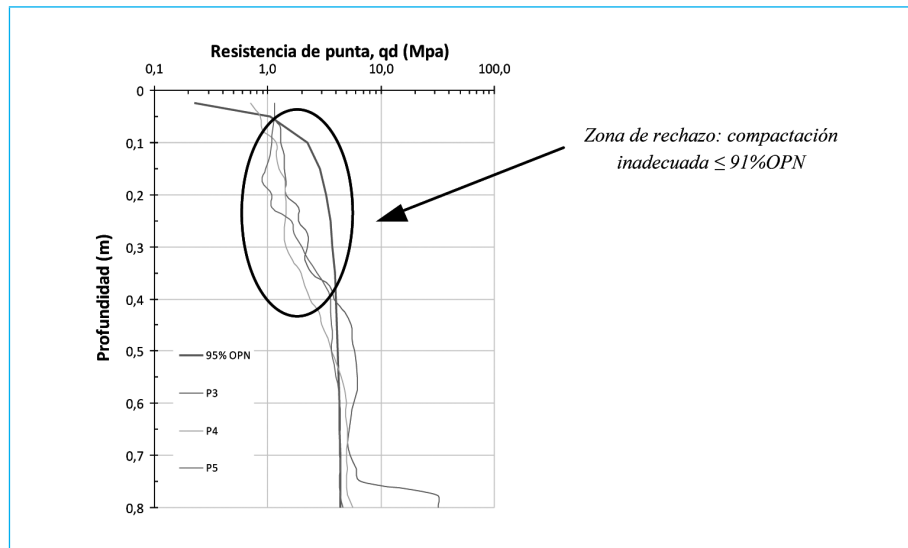
el grado de compactación obtenido como inadecuado (Gráfico 5).

El sector 2 corresponde a una zona del muro resistente recientemente compactado, según la metodología habitualmente empleada para la construcción del tranques de relave en estudio. La comparación de los resultados obtenidos indica que las señales penetrométricas se encuentran a la derecha de la curva de control de compactación, en la zona de aceptación donde la compactación es clasificada como aceptable (Gráfico 6).

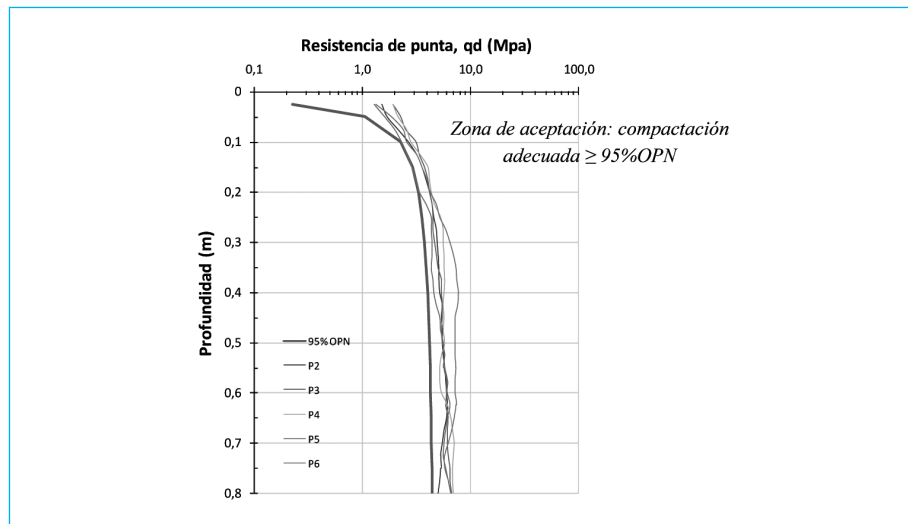
**Tabla 7.** Resultados control de compactación con cono de arena. Sectores 1 y 2

Sector	Densidad seca in situ, $\gamma_d$ (grs/cc)				Grado de compactación, OPN (%)				Humedad natural (%)			
	Media	Desv. Est.	CV%	Error	Media	Desv. Est.	CV%	Error	Media	Desv. Est.	CV%	Error
1	1,541	0,0326	2,12	0,007	91,1	1,234	1,35	0,309	16,4	2,697	16,4	0,551
2	1,627	0,0098	0,60	0,002	97,0	0,588	0,61	0,120	14,0	1,393	9,9	0,284

**Gráfico 5.** Control de compactación. Penetrómetro PANDA. Sector 1



**Gráfico 6.** Control de compactación. Penetrómetro PANDA. Sector 2

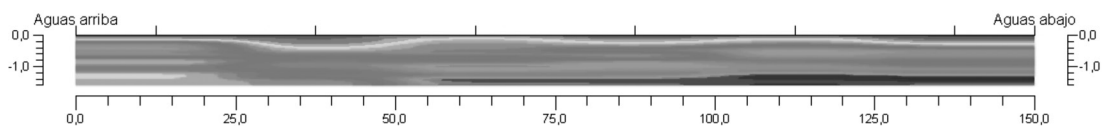


## 6.2 Estimación de la variabilidad de una capa de arenas de relave compactada

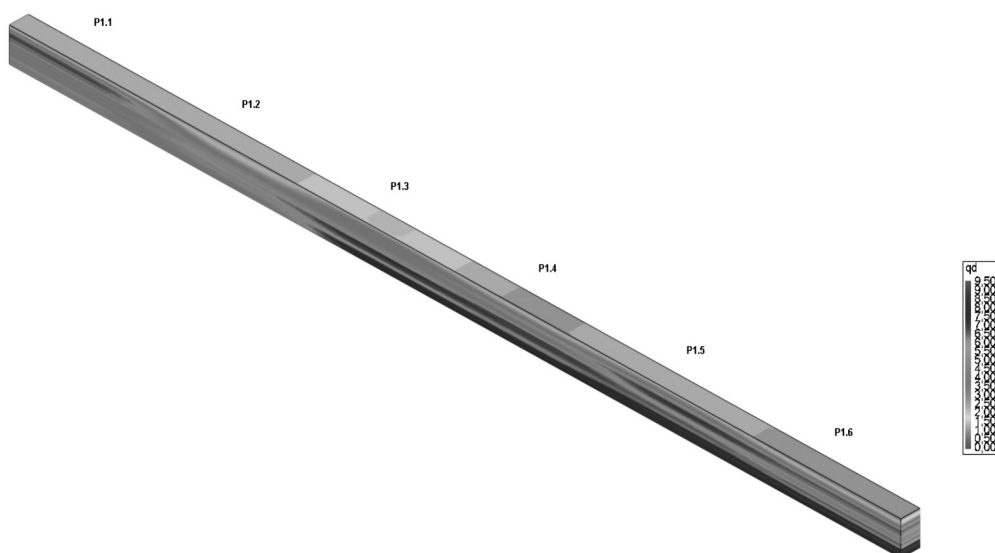
Es importante considerar en el control de una capa compactada de arenas de relave, la variabilidad material, estructural y el estado hídrico in situ, como fue señalado en los párrafos precedentes. La facilidad y rapidez en la ejecución de los ensayos de penetración PANDA, permite multiplicar los ensayos y analizar en superficie y profundidad el grado de compactación de una o varias capas de arenas compactadas. Las señales penetrométricas obtenidas en conjunto con métodos de simulación o representación espacial, permiten reconstruir un volumen de arenas de relave depositado, hasta la profundidad máxima alcanzada por los ensayos de penetración realizados.

En las figuras 4 y 5 se presentan los resultados obtenidos desde la representación espacial in situ de una capa de arenas de relave compactada de manera mecánica, a partir de la realización de 6 ensayos de penetración PANDA. El modelo de interpolación que permitió representar de mejor manera la variación de la resistencia de punta ( $q_d$ ) y su estructuración espacial, corresponde al método del inverso de la distancia anisotrópico. Las dimensiones de la capa, corresponden a un ancho igual a 3,0 (m) y una longitud en dirección talud "aguas abajo" de 70,0 (m). Como herramienta ha sido empleado el programa computacional Rockwork 15. Los resultados obtenidos pueden ser aplicados en los modelos de análisis de estabilidad de tranques de arenas de relave, considerando la variabilidad que presenta este tipo de depósitos, identificando zonas

**Figura 4.** Perfil longitudinal obtenido en función de la resistencia de punta ( $q_d$ ). Escala métrica



**Figura 5.** Reconstitución volumétrica de una serie de capas de arenas de relave depositadas, en función de la resistencia de punta ( $q_d$ )



de diversa resistencia y comportamiento mecánico. De esta manera sería posible estimar la probabilidad de falla asociada en este tipo de depósitos, aspecto no considerado actualmente por la práctica ingenieril.

## 7. Conclusiones

Los resultados obtenidos consolidan la aplicación del ensayo PANDA como una nueva alternativa, precisa, eficaz y económica para el control de compactación de tranques de arenas de relaves pertenecientes a los diversos sectores de la minería chilena del cobre.

La metodología propuesta permite determinar in situ, el grado de compactación en profundidad y el espesor de capa depositado, considerando la variabilidad material y estructural que presentan los tranques de arenas de relave, aspecto no considerado hasta ahora por la ingeniería de nuestro país. De esta manera se responde y se complementan los requerimientos establecidos en la legislación vigente y principalmente en el D.S 248 Of. 2007, innovando en los aspectos relacionados con el control de compactación de los depósitos de relaves.

La rapidez en la ejecución del ensayo PANDA y la continuidad de medidas de resistencia a la penetración en profundidad, permiten cuantificar la variabilidad espacial y temporal de las propiedades geotécnicas de las arenas de relave, utilizando métodos de estimación estadística y simulación espacial. De esta manera podrán

ser identificadas las zonas con un mayor potencial de inestabilidad mecánica y establecer la probabilidad de falla asociada a estos depósitos mineros.

Actualmente los autores de este artículo se encuentran desarrollando un proyecto para elaborar una norma nacional para el control de calidad del proceso de compactación, empleando el ensayo PANDA, transfiriendo esta tecnología que ya se encuentra en aplicación en Europa, Estados Unidos y países de Asia. De esta manera se pretende obtener una guía alternativa que produzca mejoramiento en la condición de estabilidad mecánica de un tranque de relaves durante la fase operacional y de abandono.

## Agradecimientos

Este artículo ha sido desarrollado dentro del contexto del proyecto Corfo-Innova 08CM01-13. Los autores agradecen el patrocinio a la Dirección de Investigación de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, y de las empresas Geotecnia Ambiental LTDA y Sol Solution (Francia) por la valiosa información aportada.

El desarrollo de este artículo contó con la importante colaboración del Dr. Juan Palma González, Profesor Titular de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, y del Profesor Andy Fourie (School of Civil and Resources Engineering. University of Western Australia).



## Bibliografía

1. Barrera, S y Campaña, J. "Análisis de Estabilidad de Presas de Relaves. Práctica Chilena". V Congreso Chile de Ingeniería Geotécnica. Santiago, Chile, 28-30 Noviembre, 2004.
2. Benz, M.A. (2009). "Mesures Dynamiques lors du Battage du Pénétromètre Panda 2". Doctor of Philosophy dissertation, University Blaise Pascal, Clermont Ferrand, France.
3. Benz, M.A. Cancino, P. (2005). "Control de la Calidad de Compactación y Estimación del Angulo de Fricción Interna de las Arenas de Relave con el Penetrómetro Ligerio PANDA". Tesis de título. Ingeniería en Construcción. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Chile, 2005.
4. Carvajal, C y Pacheco, A. "Diagnóstico de la Situación Actual de Tranques de Relaves de la V Región". Tesis de título. Ingeniería en Construcción. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Chile, 2005.
5. Chaigneau, L. (2001) "Caractérisation des Milieux Granulaires de Surface à l'aide d'un Pénétromètre". Doctor of Philosophy dissertation. University Blaise Pascal, Clermont Ferrand, France.
6. Engels, J. and Dixon-Hardy, D. "Tailings Related Accidents - Failures, Breaches and Mudflows". <http://www.tailings.info/accidents.htm> (Aug. 2, 2010).
7. Espinace, R.; Villavicencio, G.; Bacconnet, C.; Aliaga, J. y González, J. "Control de Compactación en Tranques de Arenas de Relaves Mediante el Penetrómetro Panda". V Congreso Chile de Ingeniería Geotécnica. Santiago, Chile, 28-30 Noviembre, 2004.
8. Espinace, R.; Villavicencio, G.; Palma, J; Peña, A, Bacconnet, C.; Gourvès, R. y Bossier, D (2007). "Nueva Alternativa para el Control de Compactación de Tranques de Relave. El Penetrómetro PANDA". Revista de la Construcción, 6 (2), pp. 3-41.
9. Gourvès, R. y Richard, B. (1995). "The Panda Ultralight Dynamic Penetrometer". Proceeding of ECSMFE. Copenhagen, Denmark, pp 83-88.
10. Gourvès, R. y Zhou, S. (1997). "The In Situ Characterization of the Mechanical Properties of Granular Media with the Help of Penetrometer". 3<sup>rd</sup> International conférence on micromécanique of granular média. Duram, pp. 57-60.
11. Minería Chilena. Revista N° 348. Junio, 2010.
12. Troncoso, J. "Dynamic Properties and Seismic Behavior of Thickened Tailings Deposits". International Symposium on Paste and Thickened Tailings Disposal. Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile, 2002.
13. Rahim, A.; Prasad, S. y George, K. (2004). "Dynamic Cone Penetration Resistance of Soils-Theory and Evaluation", Proceedings of the Geo-Trans 2004 conference. Los Angeles, California, Julio 27-31.
14. Rico, M; Benito, G.; Salgueiro, A.R.; Díez-Herrero, A.; Pereira, H.G. (2008). "Reported tailings dam failures. A review of the European Incidents in the Worldwide Context". Journal of Hazardous Materials, 152, pp. 846-852.
15. Salgado, R.; Boulanger, R. y Mitchell, J. (1997). "Lateral Effects on CPT Liquefaction Resistance Correlations". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineerong, ASCE, 123(8), 726-735.
16. Troncoso, J (1986). "Envejecimiento y estabilidad sísmica de un depósito de residuos minerales en condición de abandono". Apuntes de Ingeniería, 22, pp. 147-158.
17. Troncoso, J. "Dynamic properties and seismic behavior of thickened tailings deposits". International Symposium on Paste and Thickened Tailings Disposal. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile, 2002.
18. Troncoso, J. y Garcés, E. (2000) "Ageing effects in the shear modulus of soils". Soil dynamics and earthquake engineering, 19, pp. 595-601.
19. Verdugo, R. "Compactación de Relaves". IV Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica. Universidad Federico Santa María. Sociedad Chilena de Geotecnia. Valparaíso. Chile. Octubre 1997, pp. 29-41.
20. Villavicencio, G. (2009). "Méthodologie pour evaluer la stabilité mécanique des barrages de résidus miniers ". Doctor of Philosophy Dissertation. University Blaise Pascal, Clermont Ferrand.
21. Villavicencio, G.; Bacconnet, C.; Breul, P.; Boissier, D. y Espinace, R. (2010) Probabilistic evaluation of the parameters governing the stability of the tailing dams. 1<sup>st</sup> International Conference on Information Technology in Geo-Engineering (ICITG). Shanghai, 16-17 September, pp. 108-116.
22. Wise Uranium Project. <http://www.wise-uranium.org/mdaf.html> (Nov. 5, 2010).