CORPORACIÓN NACIONAL DEL COBRE DE CHILE

GERENCIA DE PROYECTOS

DIVISIÓN DSAL

ESTUDIO DE PRE-FACTIBILIDAD

VALIDACION DE CAPACIDAD DEPOSITO DE RELAVES FILTRADOS PLANTA TRATAMIENTO ESCORIA FUNDICION POTRERILLOS

CONTRATO N° : 4501537761

INFORME

INFORME DE MECÁNICA DE SUELOS SITIO 10

REV N°	FECHA	EMITIDO PARA	POR	REVISADO POR	APROBADO POR	APROBADO POR
0	13/02/2017	Para Uso	F. Alvarado	E. Garcia	J. Riquelme	G. Rojas
C	06/12/2016	Revisión Cliente	F. Alvarado	E. Garcia	J. Riquelme	G. Rojas
B	22/11/2016	Revisión Cliente	F. Alvarado	E. Garcia	J. Riquelme	G. Rojas
			HATCH			CODELCO

Se prohíbe su reproducción, y exhibición, sin el consentimiento de CODELCO CHILE
El documento, una vez impreso, se considera copia NO CONTROLADA y puede estar obsoleto
Copyrights © 2015 CODELCO-CHILE. Todos los Derechos Reservados

Tabla de Contenidos

1. Introducción 3

2. Alcances 3

3. Antecedentes 4

4. Inspecciones de Campo Sitio 10 4

4.1 Ejecución de Calicatas Sitio N°10 4

5. Caracterización Geotécnica de Materiales 7

5.1 Materiales de Fundación 7
5.2 Dren Basal y Muro al Pie del Depósito 9
5.3 Relaves Filtrados 9
5.3.1 Clasificación Muestras de Calicatas 10
5.3.2 Densidades Máximas y Permeabilidad 10
5.3.3 Parámetros de Resistencia en función a Ensayos Triaxiales 11

6. Conclusiones y Recomendaciones 12

Listado de Figuras

Figura 1-1: Ubicación Sitio N°10 3
Figura 4-1: Ubicación de Calicatas Sitio N°10 5
Figura 4-2: Foto Calicata 1 6
Figura 4-3: Foto Calicata 2 6
Figura 4-4: Foto Calicata 3 6
Figura 5-1: Ubicación Perfil Sísmico PS-8 *(Geodatos 2012)* 7
Figura 5-2: Velocidades de propagación de ondas PS-8 7
Figura 5-3: Esquema de Interpretación Perfil Sísmico 8
Figura 5-4: Ubicación Calicatas de Referencia 10
Figura 5-5: Proyección Circulo de Mohr – Triaxial CID Calicata 2 11

Listado de Tablas

Tabla 4-1: Coordenadas de Calicatas 4
Tabla 5-1: Velocidad de onda Corte Materiales de Fundación 8
Tabla 5-2: Características materiales prospectados 10
Tabla 5-3: Densidades y permeabilidades 10
Tabla 5-4: Esfuerzos Principales Finales de Ensayo Triaxial Drenado 11
Tabla 6-1: Parámetros Geotécnicos de Diseño 12

Se prohíbe su reproducción, y exhibición, sin el consentimiento de CODELCO CHILE
El documento, una vez impreso, se considera copia NO CONTROLADA y puede estar obsoleto
Copyrights © 2015 CODELCO-CHILE. Todos los Derechos Reservados

1. Introducción

La capacidad del Depósito de Relaves Filtrados, de la Planta de Tratamiento de Escorias de Potrerillos, actualmente en operación tiene una vida útil hasta el año 2018, sin embargo se proyecta que la vida útil de la fundición generará escoria para el proceso hasta fines del año 2022 por que lo se hace necesario definir la ubicación de un nuevo depósito de relaves filtrados de escoria, que cumpla con los estándares técnicos y medio ambientales exigidos por la Autoridad y con la capacidad de almacenamiento requerida.

Hatch desarrolló un estudio de alternativas de ubicación de sitios, en el cual concluyó que el sitio más recomendable para continuar con los estudios corresponde al sitio denominado como N° 10.

El depósito consta de una serie de plataformas de 10 m de altura máxima, que serán compactadas mecánicamente y presentarán taludes de 2.5H:1.0V, se considera un canal de contorno, la construcción de un dren basal con descarga a una piscina de acumulación de infiltraciones y el cierre por etapas de las plataformas mediante la incorporación de una capa de material granular compactado para evitar la erosión del depósito.

A continuación se muestra la ubicación del Sitio N°10.



Figura 1-1: Ubicación Sitio N°10

2. Alcances

El presente documento corresponde al Informe de Mecánica de Suelos correspondiente al sector donde se proyecta el Sitio N°10 para la depositación de relaves filtrados de escoria. Se describen las calicatas de inspección de campo realizados en la zona del sitio 10, además se presentan los resultados de las caracterizaciones geotécnicas tanto de los

Se prohíbe su reproducción, y exhibición, sin el consentimiento de CODELCO CHILE
El documento, una vez impreso, se considera copia NO CONTROLADA y puede estar obsoleto
Copyrights © 2015 CODELCO-CHILE. Todos los Derechos Reservados

materiales de fundación como del relave filtrado de escoria, basados en estudios previos realizados para un sector aledaño, distante 1,0 km aproximadamente, donde se emplaza el depósito correspondiente al Sitio N°1, que se encuentra actualmente en operación. En el informe de la Ref. (2) se presentan los análisis de laboratorio y estudios geotécnicos realizados anteriormente por Hatch y que servirán de base para el presente documento correspondiente a la etapa de prefactibilidad del proyecto.

3. Antecedentes

Ref. (1) Goodman, R. (1980). Introduction to rock mechanics. New York, USA: Jhon Wiley and Sons, pp (170-253).

Ref. (2) Informe N° S15F220-C-P126-CI-INF-001. Mecánica de Suelos. HATCH, Febrero 2016.

Ref. (3) Wong, K. S., and Duncan, J. M. (1974). Hyperbolic Stress–Strain Parameters for Nonlinear Finite Element Analyses of Stresses and Movements in soil Masses, Geotechnical Engineering Report TE 74-3 to the National Science Foundation, Office of Research Services, University of California, Berkeley, CA.

Ref. (4) Estudio Sísmica Refracción y REMI Proyecto EPCM Planta de Tratamiento de Escoria, Informe desarrollado por Geodatos, Mayo 2012.

4. Inspecciones de Campo Sitio 10

4.1 Ejecución de Calicatas Sitio N°10

Se ejecutaron 3 calicatas en la zona, las cuales se presentan en la Figura 4-1. Dichas calicatas se ejecutaron hasta 5m de profundidad y mediante retroexcavadoras.

Tabla 4-1: Coordenadas de Calicatas

UBICACIÓN		Calicata C-1	Calicata C-2	Calicata C-3
COORDENADAS UTM DATUM WGS84 HUSO 19	N	7.076.759	7.076.828	7.076.865
	E	451.221	451.255	451.140

Se prohíbe su reproducción, y exhibición, sin el consentimiento de CODELCO CHILE
El documento, una vez impreso, se considera copia NO CONTROLADA y puede estar obsoleto
Copyrights © 2015 CODELCO-CHILE. Todos los Derechos Reservados



Figura 4-1: Ubicación de Calicatas Sitio N°10

- Se determinó que los materiales de las calicatas eran muy similares entre ellos y que correspondían a la Grava de Atacama.
- No se encontró nivel freático pero sí una leve humedad. No se consideró en esta ocasión la toma de muestras para análisis de laboratorio lo cual correspondería a una acción futura.
- El material extraído de las zanjas fue clasificado como arena limosa con gravas duras, frescas, no alteradas. Se estimó que el material tenía una permeabilidad baja a media, con un índice de plasticidad bajo. Su consistencia era alta y no se apreciaron derrumbes en sus paredes.
- No se apreciaron horizontes dentro de los 5m explorados y no hubo evidencias de variaciones identificándose al material como homogéneo.
- El material es consistente con una cementación aparente alta, lo que permite desarrollar taludes empinados.
- En una zona cercana, en la antigua cancha de tenis del sector que se encuentra a unos 300m de la calicata C1, existe un túnel excavado en este material de unos 50m de longitud que transporta aguas de una canal. Dicho túnel se mantiene estable sin soportes y corresponde a una obra de varias decenas de años.
- En la Figura 4-2, Figura 4-3 y Figura 4-4 se muestran las fotos de las calicatas.

Se prohíbe su reproducción, y exhibición, sin el consentimiento de CODELCO CHILE
El documento, una vez impreso, se considera copia NO CONTROLADA y puede estar obsoleto
Copyrights © 2015 CODELCO-CHILE. Todos los Derechos Reservados



Figura 4-2: Foto Calicata 1



Figura 4-3: Foto Calicata 2



Figura 4-4: Foto Calicata 3

Se prohíbe su reproducción, y exhibición, sin el consentimiento de CODELCO CHILE
El documento, una vez impreso, se considera copia NO CONTROLADA y puede estar obsoleto
Copyrights © 2015 CODELCO-CHILE. Todos los Derechos Reservados

5. Caracterización Geotécnica de Materiales

5.1 Materiales de Fundación

En base a la inspección de campo realizada, descrita en el punto anterior, se reconoce que las características de suelo de fundación para el sitio 10 son similares a las encontradas en el Sitio N°1 actualmente en operación, por lo que para esta etapa de ingeniería de prefactibilidad Hatch considerará que las características geotécnicas del suelo de fundación del Sitio N°10 serán similares a las encontradas en el Sitio N°1.

Un estudio geofísico realizado por Geodatos el año 2012 (Ref. (4))consideró la ejecución de 8 perfiles REMI de los cuales el perfil PS-8 es aquel que se encuentra más próximo al sector de estudio del Sitio N°10 , aproximadamente 900 metros. En esta etapa de la ingeniería se consideraron válidos los resultados obtenidos y aplicables en lo que corresponda al sitio 10.

En la siguiente figura se muestra la ubicación en planta de este perfil sísmico:



Figura 5-1: Ubicación Perfil Sísmico PS-8 *(Geodatos 2012)*

El método de refracción sísmica permitió caracterizar la estructura del subsuelo mediante la distribución de velocidades a lo largo de los perfiles medidos.

Las estructuras encontradas en el perfil sísmico PS-8 presentan las siguientes velocidades de propagación de ondas:

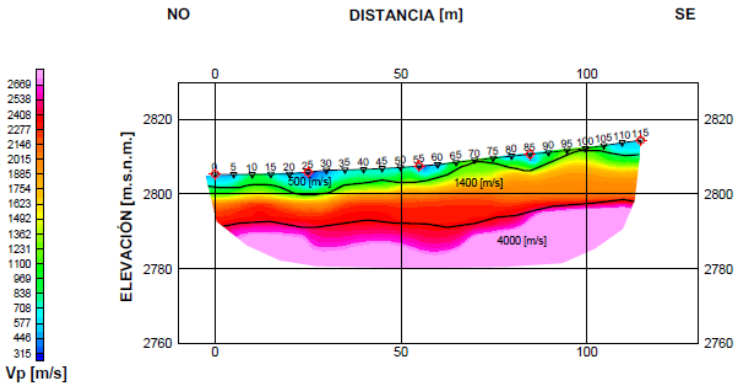

Figura 5-2: Velocidades de propagación de ondas PS-8

Se prohíbe su reproducción, y exhibición, sin el consentimiento de CODELCO CHILE
El documento, una vez impreso, se considera copia NO CONTROLADA y puede estar obsoleto
Copyrights © 2015 CODELCO-CHILE. Todos los Derechos Reservados

Las interpretaciones realizadas se presentan en la figura PS-8:

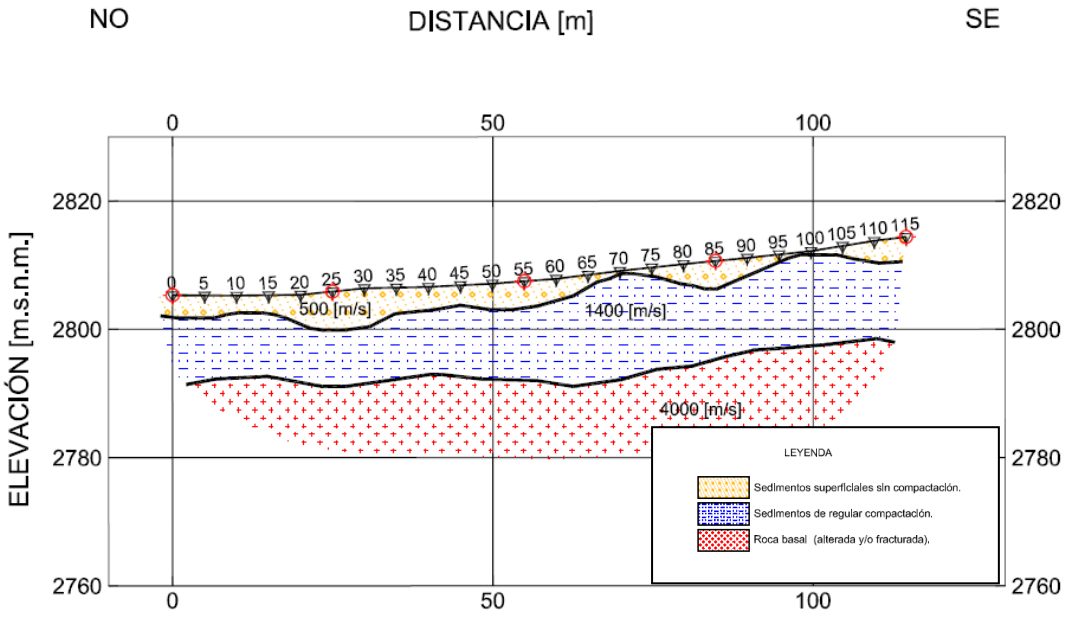

Figura 5-3: Esquema de Interpretación Perfil Sísmico

- Velocidad de 500 - 700 [m/s], corresponde a sedimentos superficiales sin compactación.
- Velocidad de 1000 – 1400 [m/s], corresponde a sedimentos de regular compactación.
- Velocidad de 1800 - 4000 [m/s]. Esta unidad se subdivide en velocidades Vp comprendidas entre 1800 - 2400 [m/s], lo que se puede correlacionar con sedimentos compactos y/o roca muy alterada/fracturada. Para aquellos perfiles en que se observan velocidades mayores a 3000 [m/s], dicho estrato se correlaciona con roca basal (alterada y/o fracturada).

En la Tabla 5-1, las velocidades de onda de corte en función a los materiales de fundación de la zona, y en la
Figura 5-3 se presenta un esquema con la distribución en profundidad de los materiales y las velocidad de onda de compresión asociadas, en base al mismo estudio.

Tabla 5-1: Velocidad de onda Corte Materiales de Fundación

Tipo de Suelo	Espesor (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Módulo de Poisson
Unidad 1	3.5	346	600	0.25
Unidad 2	20	665	1150	0.25
Unidad 3	>20	1290	2250	0.26

Se sabe que las gravas mal gradadas pueden tener ángulos de fricción entre 36° y 42° en promedio (Ref. (3)), dependiendo de la densidad relativa, donde a mayor densidad relativa mayor ángulo de fricción. Por otro lado, el ángulo de fricción de algunas rocas varía de acuerdo al nivel de alteración y puede alcanzar valores tan altos como 51° (Ref. (1)). En

Se prohíbe su reproducción, y exhibición, sin el consentimiento de CODELCO CHILE
El documento, una vez impreso, se considera copia NO CONTROLADA y puede estar obsoleto
Copyrights © 2015 CODELCO-CHILE. Todos los Derechos Reservados

cuanto al peso específico de rocas con poco nivel de alteración, los valores pueden alcanzar en promedio 26KN/m3.

Para caracterizar las propiedades geotécnicas de los materiales de fundación se consideró la experiencia en proyectos anteriores y literatura especializada.

Para la unidad 2 se determinó una velocidad de onda de corte de 665 m/s, por lo que se considera que este material tiene alta densidad relativa. De manera conservadora se asumió un valor de 35° de ángulo de fricción y una cohesión de 9.8KPa, y en base a experiencias anteriores se asumió un peso específico de 20.69KN/m3.

Para la unidad 3 se encontró una velocidad de onda de corte de 1290m/s, por lo que se puede considerar esa unidad como roca intacta o con bajo nivel de alteración. De manera conservadora se asumió un ángulo e fricción de 35° y una cohesión de 9.8KPa. En cuanto al peso específico se consideró el mismo valor del material de la unidad 2 y un peso específico de 20.69 KN/m3.

5.2 Dren Basal y Muro al Pie del Depósito

El sistema de drenaje del depósito de relaves se compone de 2 elementos; el dren basal y el muro al pie del depósito.

El dren basal está conformado por un geotextil no tejido, material Drenante compuesto por grava limpia, un material de transición y un material de filtro para evitar la colmatación de partículas más finas. Mientras el muro al pie del depósito está conformado por material de empréstito compactado al 95% del Proctor Modificado.

Se consideró que por el proceso constructivo el muro tendría propiedades de resistencia mayores al dren basal. En base a las características granulométricas del muro, las características del dren basal y en base a proyectos anteriores realizados por Hatch, se asumió un ángulo de fricción de 30° y una cohesión de 10KPa para el dren basal, y un ángulo de fricción de 33° y una cohesión de 10KPa para el muro.

Se asumió que el material podría alcanzar los 600m/s de velocidad de onda de corte. También se asumió, en base a experiencias anteriores, que el peso especifico estará en el orden de 17.7 KN/m3 para el dren basal y 19 KN/m3 para el muro al pie del depósito. Se considerará además que los materiales tendrán un módulo de Poisson de 0.3.

5.3 Relaves Filtrados

Principalmente las condiciones del sitio son secas y el material se mantendrá con una humedad por debajo de la humedad de saturación. Además, el material será compactado al 95% del Proctor Estándar.

En esta etapa de ingeniería de prefactibilidad, los estudios previos realizados en los relaves compactados del Sitio N°1, actualmente en operación, servirán como referencia para definir los parámetros geotécnicos del relave filtrado de escoria depositado y compactado en el Sitio N°10.

La siguiente figura muestra la ubicación de las calicatas realizadas para el análisis geotécnico del relave:

Se prohíbe su reproducción, y exhibición, sin el consentimiento de CODELCO CHILE
El documento, una vez impreso, se considera copia NO CONTROLADA y puede estar obsoleto
Copyrights © 2015 CODELCO-CHILE. Todos los Derechos Reservados



Figura 5-4: Ubicación Calicatas de Referencia

5.3.1 Clasificación Muestras de Calicatas

En la **Tabla 5-2** se presentan las características principales determinadas para las muestras tomadas de las calicatas (Ref. (2)):

Tabla 5-2: Características materiales prospectados

Calicata	Prof (m)	Sobretamaño (%)	Tamaño Máximo (mm)	% Que Pasa		LL	IP	USCS
				N°4	N°200			
C1-1	0,50 - 4,00	-	N° 4	100	90	-	NP	ML
C1-2	0,50 - 4,00	-	N° 4	100	86	-	NP	ML
C1-3	0,00 - 4,00	-	N° 4	100	85	-	NP	ML
C1-4	0,00 - 4,00	-	N° 4	100	85	-	NP	ML
C1-5	0,00 - 4,00	-	N° 4	100	90	-	NP	ML

5.3.2 Densidades Máximas y Permeabilidad

En la **Tabla 5-3** se presentan los resultados de densidad, humedad natural seca, y Proctor Estándar obtenidas para las muestras (Ref. (2)):

Tabla 5-3: Densidades y % de Humedad

Calicata	Prof (m)	$\gamma_{d\text{-}Nat}$ (gr/cm^3)	Humedad Nat (%)	$\gamma_{d\text{-}Máx}$ (gr/cm^3)	Humedad Optima (%)	% Proctor
C1-1	0,50 - 4,00	2,109	6,5	2,301	10,6	91,7%
C1-2	0,50 - 4,00	2,225	7,4	2,283	10,8	97,5%
C1-3	0,00 - 4,00	2,272	7,8	2,337	10,4	97,2%
C1-4	0,00 - 4,00	2,268	6,5	2,322	11,0	97,7%
C1-5	0,00 - 4,00	2,252	8,0	2,341	10,7	96,2%

El coeficiente de permeabilidad se estima en 1x10^{-5} cm/s.

Se prohíbe su reproducción, y exhibición, sin el consentimiento de CODELCO CHILE
El documento, una vez impreso, se considera copia NO CONTROLADA y puede estar obsoleto
Copyrights © 2015 CODELCO-CHILE. Todos los Derechos Reservados

5.3.3 Parámetros de Resistencia en función a Ensayos Triaxiales

De los análisis realizados se considerarán aquellos correspondientes a los ensayos de muestras drenadas obtenidas de la calicata 2.

Para determinar los parámetros de resistencia primero se definió la condición de falla en términos de resistencia:

- Para una condición estática se espera que las deformaciones unitarias sean menores, dado que el material no estará saturado y será compactado. En este caso sería más adecuado considerar un parámetro de resistencia peak.
- Para la condición pseudo estática es posible utilizar un porcentaje de la resistencia peak o la resistencia residual, dependiendo de la caracterización del material.
- Para un análisis sísmico después del terremoto es recomendable utilizar la resistencia residual del relave.

En base a la información existente y al tipo de material que conforma el depósito, para realizar los análisis de estabilidad estático y pseudo estático, se recomienda utilizar los parámetros de resistencia residual.

Para determinar la resistencia residual se recurrió a la teoría del circulo de Mohr. La definición de p' y q dados por el laboratorio (Geocontrol) fueron:

$$p' = \frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2} \quad (1)$$

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (2)$$

En la Tabla 5-4 se presentan los esfuerzos principales finales del ensayo triaxial drenado y en la Figura 5-5 se presentan los círculos de Mohr para dicho ensayo.

Tabla 5-4: Esfuerzos Principales Finales de Ensayo Triaxial Drenado

Ensayo	Corte	σ_1' (kg/cm^2)	σ_3' (kg/cm^2)
CID Calicata 2	Corte 1	2.88	0.5
	Corte 2	4.92	1.0
	Corte 3	9.08	2.0

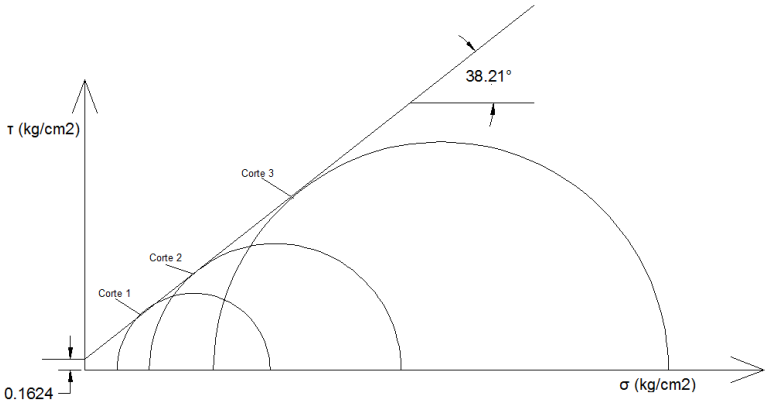

Figura 5-5: Proyección Circulo de Mohr – Triaxial CID Calicata 2

Se prohíbe su reproducción, y exhibición, sin el consentimiento de CODELCO CHILE
El documento, una vez impreso, se considera copia NO CONTROLADA y puede estar obsoleto
Copyrights © 2015 CODELCO-CHILE. Todos los Derechos Reservados

Finalmente se definieron parámetros de resistencia residual de 38.21° de ángulo de fricción y 0.16kg/cm2 de cohesión.

En base a los resultados obtenidos se considera un peso específico del material de 21.77KN/m^3.

6. Conclusiones y Recomendaciones

- En base a los trabajos de campo para el sitio 10 se determinó que los materiales de fundación eran similares a los que se encontraron en el existente deposito de relaves filtrados de Potrerillos.
- Los materiales que conforman el depósito de relaves serán, materiales de fundación, dren basal, muro al pie del depósito y relaves.
- En este informe se describieron los hallazgos encontrados en campo y laboratorio tanto de materiales de fundación como de relaves filtrados del trabajo anterior realizado por Hatch.
- Como antecedente se sabe que el relave en campo es compactado al 95% del Proctor Estándar, que los materiales dispuestos tienen humedad menor a la humedad de saturación y que no hay presencia de nivel freático en el mismo depósito de relaves.
- La definición de los relaves es de suelo fino compuesto por limo con algo de arenas.
- La caracterización de los parámetros de resistencia se basó en revisión de literatura especializada, estudios anteriores para sitios cercanos al actual proyecto y trabajo de campo en la misma zona.
- En base a la información revisada se determinaron los siguientes parámetros de resistencia para los materiales que conformarían el depósito de relves de la zona sitio 10.

Tabla 6-1: Parámetros Geotécnicos de Diseño

Material	Φ (deg)	γ_m (t/m^3)	c (KPa)	Vs (m/s)	v (-)
Fundación Roca	35.0	20.69	9.8	1290	0.26
Fundación Suelo	35.0	20.69	9.8	665	0.25
Relaves Filtrados	38.21	21.77	15.88	-	0.3
Dren Basal	30.0	17.7	0.0	600	0.3
Muro	33.0	19.0	10.0	600	0.3

Se consideró para los relaves resistencia residual y, para el resto de materiales, valores de resistencia típicos de materiales similares utilizados en estudios anteriores para el mismo relave en estudio.

Se prohíbe su reproducción, y exhibición, sin el consentimiento de CODELCO CHILE
El documento, una vez impreso, se considera copia NO CONTROLADA y puede estar obsoleto
Copyrights © 2015 CODELCO-CHILE. Todos los Derechos Reservados