

Características geológicas y geotécnicas de los lodos de flotación de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión (SE España)

R. Rodríguez⁽¹⁾, C. García⁽²⁾, M. Zarroca⁽³⁾, C. Roque⁽⁴⁾, R. Linares⁽³⁾ y L. Oldecop⁽⁵⁾

(1) Instituto Geológico y Minero de España. Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid, España
roberto.rodriguez@igme.es

(2) Departamento de Ingeniería Minera, Geología y Cartografía. Universidad Politécnica de Cartagena.
Paseo Alfonso XIII, 52. 30203 Cartagena. España.
cristobal.garcia@upct.es

(3) Departamento de Geología. Universidad Autónoma de Barcelona. Cerdanyola del Vallès. 08193 Bellaterra. Barcelona, España.
mario.zarroca.hernandez@uab.cat, rogelio.linares@uab.cat

(4) Área de Geodinámica Externa y Geomorfología. Universidad de Girona. Campus Montilivi s/n, 17071 Girona, España
scutellinia@gmail.com

(5) Instituto de Investigaciones Antisísmicas. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de San Juan.
Av. Libertador 1290 (Oeste). 5400 San Juan. Argentina.
oldecop@unsj.edu.ar

RESUMEN

En el trabajo se presentan los resultados de la caracterización geológico-geotécnica de los lodos de flotación (LF) de la Sierra Minera Cartagena-La Unión. Se han estudiado los LF almacenados en ocho presas, en las que se ha realizado la toma y caracterización de 42 muestras. Se han efectuado ensayos granulométricos, medida del peso específico de las partículas sólidas, determinación del índice de plasticidad, medidas de permeabilidad *in situ* y de laboratorio, corte directo y humedad. Los LF según los análisis granulométricos se clasifican como limos arenosos. Presentan un índice de plasticidad medio, bajo a nulo. El ángulo de fricción interna varía entre 25 y 42 grados. La cohesión es nula o baja entre 0 y 2,2 t/m². El peso específico de las partículas sólidas tiene un amplio rango de variación entre 1,8 y 4 g/cm³. La conductividad hidráulica saturada oscila entre 1,3x10⁻⁵ y 3,2x10⁻⁹ m/s. Las determinaciones *in situ* de humedad muestran que el grado de saturación permanece relativamente elevado, a pesar de las bajas precipitaciones y las elevadas tasas de evaporación. Varias presas de residuos han fallado. Las principales causas de fallos ó rotura de las presas son: 1) deslizamiento del talud, 2) sobrepaso de agua, 3) erosión del dique, 4) subsidencias o colapso del terreno. El principal problema que favorece el proceso de fallo o rotura de la presas es la existencia de un alto grado de saturación en los LF almacenados y el almacenamiento de agua en la laguna de decantación.

Palabras clave: ángulo de fricción interna, características geológico-geotécnicas, lodos de flotación, residuos mineros, rotura de presas de lodos de flotación

Geological and geotechnical characteristics of the tailings dams at Sierra Minera de Cartagena-La Unión (SE Spain)

ABSTRACT

We present the results of a geological and geotechnical characterization of the metallurgic waste from the Sierra Minera de Cartagena-La Unión. We have studied eight tailings dams from which we collected and analysed 42 samples of metallurgic waste. We measured grain-size distribution, the specific gravity of solid particles, plasticity index, permeability, both in situ and in the laboratory, direct shear characteristics and moisture content. According to size distribution the tailings can be classified as sandy silt. Their plasticity index ranges from medium to nil. The internal friction angle varies between 28 and 42 degrees. Cohesion is between 0 and 2.2 t/m². The specific gravity of the solid particles ranges widely from 1.8 to 4 g/cm³. The saturated hydraulic conductivity values vary between 1.3x 10⁻⁵ and 3.2x 10⁻⁹ m/s. The water content measured in situ shows that the degree of saturation remains relatively high despite low rainfall and high evaporation rates. Several tailings dams have failed. The leading causes of tailings-dam failure are: 1) slope instability; 2) overflow; 3) erosion; and 4) subsidence or collapse. The main factor leading to dam failure is that the tailings stored in the ponds are highly saturated.

Key words: geological and geotechnical characteristics, internal friction angle, mining waste, tailings dams, tailings-dam failure

Introducción

Las acumulaciones de residuos mineros (presas, desmontes, pilas de lixiviación, etc.) son estructuras destinadas a ser estables en el tiempo pues son construidas a perpetuidad. Dentro de éstas, las presas de lodos de flotación (colas, relaves, jales, *tailings*) son estructuras geotécnicas singulares, destinadas a durar indefinidamente en el tiempo. Uno de los desafíos más importantes planteados por la Directiva Europea 2006/21/CE (Real Decreto 975/2009) en relación a este tipo de residuos almacenados en estos depósitos es predecir su comportamiento espacio temporal a corto, medio y largo plazo (varios siglos), así como evaluar su riesgo ambiental para la salud y el medio ambiente.

El hecho de que las acumulaciones de residuos estén destinadas a durar indefinidamente en el tiempo es una condición de diseño muy inusual en ingeniería civil. Por otro lado, muchos depósitos de lodos de flotación (LF) que se construyen actualmente tienen dimensiones de altura de la presa superiores a los 100 metros (Rodríguez y García-Cortés, 2006) y capacidad de almacenamiento de volúmenes extraordinariamente grandes, que exceden largamente las experiencias previas en rellenos artificiales, construidos como parte de obras de ingeniería civil a lo largo de su historia. Muchos de estos grandes depósitos de LF se construyen como parte de proyectos mineros metalíferos en regiones áridas de América del Sur, principalmente a lo largo de la Cordillera de los Andes, en Perú, Chile y Argentina. En España, el número de presas y balsas es de 976 (Rodríguez y García-Cortés, 2006).

La estabilidad geotécnica y funcionamiento hidráulico de las presas y balsas de LF está condicionada por un conjunto de procesos naturales, geológicos, climáticos y de interacciones que se realizan con el entorno, tales como el propio vertido de lodos, precipitación, evaporación, extracción de agua, excedente de agua en la laguna de decantación, ingreso de agua superficial y subterránea, drenaje de agua subterránea hacia los materiales geológicos del sustrato (fundación) o a través del dique que conforma la presa; todos ellos influidos por una serie de fenómenos singulares asociados a la fina granulometría de los LF, tales como: consolidación, estratificación, grietas de desecación, infiltración, escurrimiento superficial, ascenso capilar, succión y cohesión.

El funcionamiento hidráulico de un depósito de LF, tanto durante su etapa de construcción y operación, como después de su cierre y abandono, es determinante para establecer las condiciones de estabilidad física de las presas y balsas. En la Figura 1 se mues-

tra un modelo conceptual ideal de funcionamiento de una presa de LF. Los LF de origen metalúrgico son vertidos y almacenados con un contenido inicial de humedad que depende principalmente del tratamiento que reciben en la planta, al finalizar el proceso de extracción del mineral. De acuerdo a su humedad, los LF se clasifican en: a) fluidos, b) en pasta y c) secos o filtrados.

Considerando lo anteriormente expuesto, parece útil observar el comportamiento de antiguos depósitos de LF abandonados, para adquirir conocimientos acerca de su comportamiento a largo plazo y las tendencias de evolución de sus propiedades geotécnicas.

Este trabajo tiene como objetivo realizar la caracterización geológica-geotécnica de los LF almacenados en el vaso de las presas de LF que están abandonadas en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión (SMCU). El trabajo se ha efectuado en dos fases: 1) observación cualitativa de las características geológicas y geotécnicas de las presas y balsas, mediante cartografía, muestreo y ensayos en el terreno y 2) interpretación de los resultados de los ensayos geotécnicos e hidrogeológicos realizados *in situ* y en el laboratorio.

Área de estudio

La Sierra Minera de Cartagena-La Unión (SMCU) tiene aproximadamente 50 km² y una dilatada historia de explotación de sus yacimientos minerales. La extracción de hierro, plomo y zinc comenzó a partir de la presencia romana en la Península Ibérica (s.III a.C.). El último periodo de actividad minera estuvo comprendido entre 1940 a 1991. A partir del año 1991, todos los trabajos mineros cesaron y la mayoría de los depósitos de LF fueron abandonados sin ningún tipo de rehabilitación o plan de cierre. Durante los diferentes periodos de explotación de estas minas se extrajeron del orden de 3 millones de toneladas de concentrados de Zn, Cu, Pb y Fe. Esta actividad dio lugar a la generación de un gran volumen de LF, estimado en 175 millones de metros cúbicos. De acuerdo con los trabajos de García (2004), en el área se han cartografiado nueve tipos de residuos minero-metalúrgicos (Figura 2). En la zona se identificaron ochenta y nueve presas y una balsa. La potencia de los depósitos varía entre los 4 y los 35 metros. En la SMCU, la precipitación media anual es de 339 mm y la evapotranspiración total media anual es de 904 mm, calculados mediante el método Thornthwaite, y 724 mm calculados con el método de Penman (García, 2004).

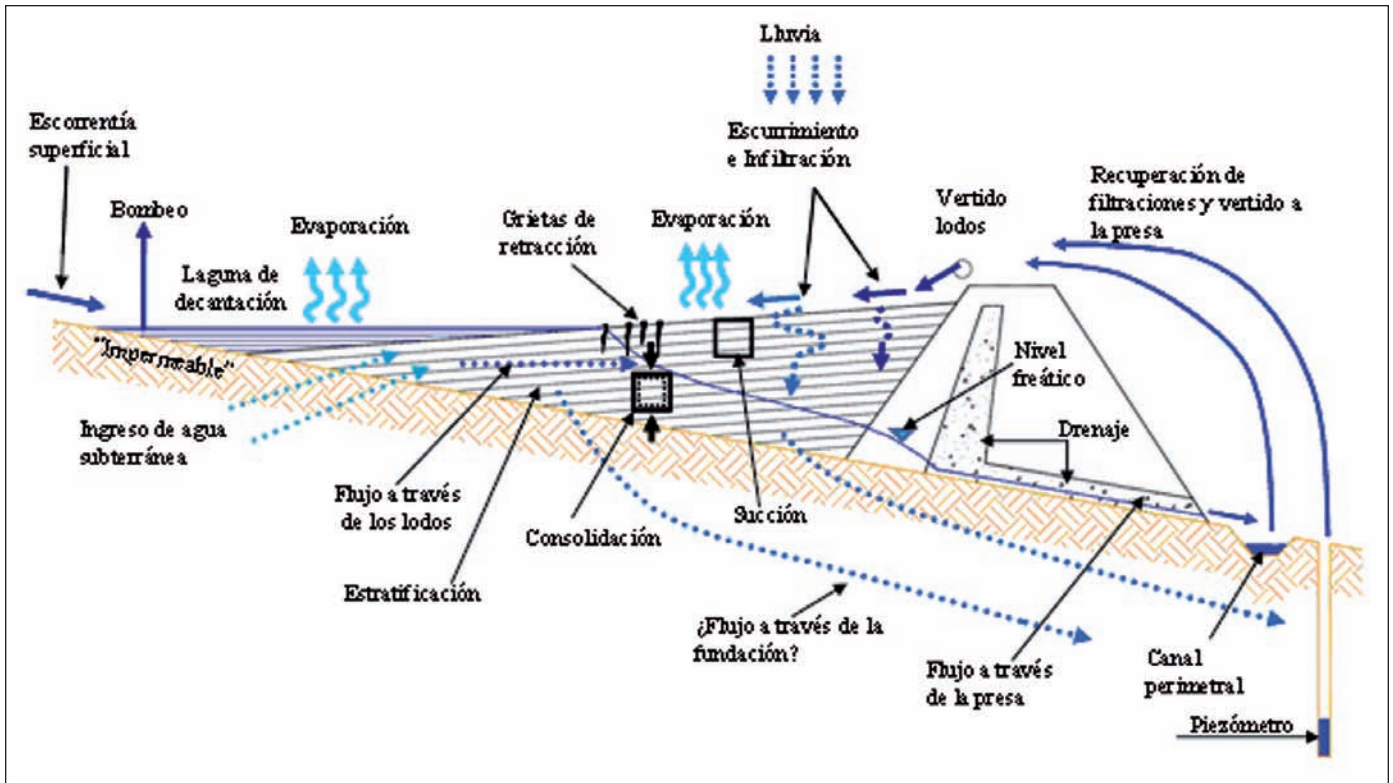


Figura 1. Modelo conceptual de una presa de residuos mineros indicando los factores que afectan su funcionamiento (Modificado de Zandarín et al., 2009)
 Figure 1. Conceptual model of a tailings pond, indicating the factors and phenomena affecting its function (Modified of Zandarín et al., 2009)

Métodos de construcción de las presas de LF en la SMCU

Las presas se construían con el método arcaico de recrecimiento mediante hincado de estacas y puesta de tablas en el contorno (Figura 3). Las tablas constituían la barrera para evitar la salida de los sólidos. Las estacas y tablas están en su mayoría desintegrados o destruidos. En la Figura 3 se muestran vestigios de este sistema de construcción de las presas. Las estacas hincados cumplían dos funciones: primero estabilizaban el entablado evitando la salida del material sólido y en segundo lugar actuaban como soporte de las canaletas o tuberías de vertido de los LF. Los resultados de la cartografía e inventario de la SMCU muestran que, de acuerdo al método constructivo, el proceso de crecimiento con el hincado de palos y entablado, se realizaba siempre aguas arriba de los cauces, o bien, pendiente arriba en el caso de los depósitos de LF colocados en ladera o en terreno llano (Figura 3). Aunque hay que señalar que, según el trabajo de campo y la información disponible, en ningún caso se construyó un dique inicial en la base de la presa.

La totalidad de las presas han sido construidas por el método de relleno hidráulico. Los LF del proceso de extracción metalúrgica por el método de flotación, son en esencia una roca finamente molida, mezclada con agua (30% sólidos: 70% líquido), con la consistencia de un lodo, eran bombeados a través de tuberías o enviada por gravedad por medio de canaletas de madera hacia el depósito. Las canaletas se perforaban y por los huecos abiertos, según se necesitaba, se distribuían los materiales quedando los gruesos en el frente de vertido. El transporte y vertido de los LF en la mayoría de las presas se realizó por gravedad. Los LF vertidos desarrollan un proceso de clasificación por segregación de las partículas sólidas donde el material más grueso (arenas) quedaba en la zona próxima al cierre elaborado con las tablas y el material más fino (limos y arcillas) escurría e iba a parar a la laguna de decantación. En la zona intermedia entre el cierre y la laguna de decantación se encuentra un material transicional entre arenas y limos. Hay que señalar que en el proceso de segregación de los LF influyen varios aspectos, entre los que se puede señalar: 1) la densidad de los LF, 2) la energía con que son

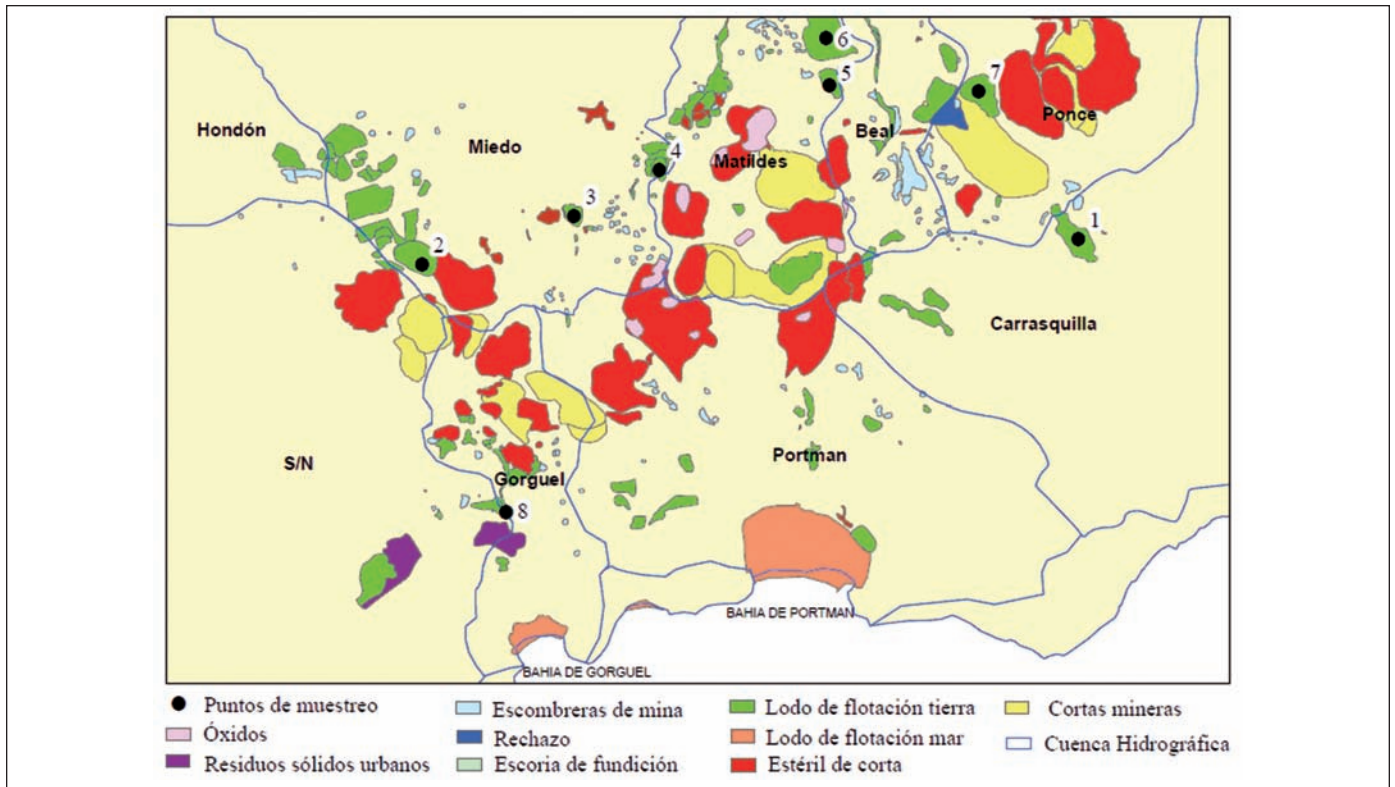


Figura 2. Localización geográfica de los residuos minero-metalúrgicos en Sierra Minera de Cartagena –La Unión y localización de las presas estudiadas

Figure 2. Geographical sites of the mining and metallurgical wastes in Sierra Minera de Cartagena –La Unión and the distribution of the tailings impoundments studied

vertidos, 3) la pendiente y 4) el recorrido en el interior de la presa. Como la evaporación de la zona es tan intensa, el proceso de secado de los LF se producía rápidamente. Los LF se depositaron empleando el

método de vertido puntual o simultáneo de varios puntos del contorno del entablado. El punto de vertido se movía a criterio del operario por todo el contorno de la presa, sin ninguna metodología estableci-



Figura 3. Sistema de construcción de las presas de lodos de flotación en Sierra Minera de Cartagena –La Unión: presa El Lirio y b) Presa Santa Antonieta

Figure 3. Manner of construction of the tailings ponds in Sierra Minera de Cartagena –La Unión: a) El Lirio tailings pond; b) Santa Antonieta tailings pond

da, sólo considerando el nivel de llenado por sectores. El vertido puntual dio lugar a la formación de sistemas de estratificación en capas de diferentes espesores, formación de grietas de retracción por desecación, así como la formación de estratificación cruzada y paleocanales en el interior de las presas (Figura 4). En las presas de LF, durante su construcción, no se realizó la impermeabilización del vaso, ni se establecieron sistemas de drenaje interior. La ausencia de drenaje dificulta la evacuación del volumen de agua de precipitación que ingresa a las presas de LF. La salida del agua en las presas de LF en la SMCU tiene tres vías: 1) evaporación, 2) infiltración y 3) sobrepaso del talud.

La gran mayoría de las presas de LF se encuentran sin revegetar, en estado similar al de la Figura 3. Esto trae consigo que sobre ella se produzcan importantes

procesos de erosión hídrica y eólica. La acumulación del agua en la laguna de decantación (pues la presa funciona generalmente como una cuenca endorreica, debido a que no existe un sistema de drenaje o el que existía ha dejado de funcionar), facilita el encharcamiento del agua y la saturación de los LF en profundidad. En el proceso de saturación desempeña un papel importante la estratificación de los lodos, pues estas capas tienen continuidad entre el punto de vertido y la laguna de decantación. La inclinación de las capas de LF estratificadas varía entre 1 y 5 grados. La permeabilidad hidráulica saturada del material se incrementa desde la laguna de decantación hacia el punto de vertido. Además, en el proceso de saturación de los LF influyen también las grietas de desecación. Las capas de LF estratificadas y agrietadas pueden aumentar la conductividad hidráulica saturada



Figura 4. a) Estratificación, b) paleocanal, c) grietas de retracción y d) eflorencias
Figure 4. a) Stratification; b) palaeochannel; c) retraction crack; d) efflorescences

hasta tres órdenes de magnitud con relación al medio homogéneo (Rodríguez, 2006). En la Figura 5 se muestra un modelo conceptual de funcionamiento hidráulico de las presas de LF existentes en la SMCU. De acuerdo a la información existente, en ninguno de los casos se ha comprobado la existencia de conexión hidráulica entre los lodos de flotación y el acuífero. La principal diferencia entre una presa construida por el método arcaico y una presa es que la segunda tiene un dique inicial con sucesivos crecimientos (Figura 1).

La ausencia de vegetación facilita el proceso de meteorización de los LF. Si se observan las presas deforestadas, se puede ver un color ocre en superficie, indicativo de los procesos de oxidación de los minerales de hierro y sulfuros metálicos existentes en los LF (Figura 3). La acumulación de agua, sales y nutrientes en las zonas deprimidas facilita el desarrollo de la vegetación, por colonización natural de las plantas, sobre todo en la laguna de decantación, como se puede observar en la Figura 6.

Según su emplazamiento, en el terreno se pueden diferenciar seis tipos de depósitos de LF (Figura 7): 1) en llano o exenta, 2) cierre de valle, 3) en depresiones (cortas), 4) junto a cursos de agua, 5) en ladera y 6) en bahía. En corta solo existe una, la construida en el interior de la corta Tomasa.

Características de presas de almacenamiento de LF estudiadas en la SMCU

Para la caracterización geotécnica se han seleccionado ocho presas de LF que son representativas de las 89 existentes en la SMCU. Las principales características y localización de las mismas se muestran en la Tabla 1 y Figura 2. A continuación se describe brevemente cada una de ellas.

Depósito 1. Presa El Lirio (EL)

Está ubicado en la zona conocida como Coto Ponce, inmediatamente al Sureste de la mina del mismo nombre, al Sureste del Llano del Beal. Desde el punto de vista hidrológico, está situado en una vaguada que es tributaria de la Rambla Carrasquilla. La construcción del mismo se realizó sin impermeabilización del lecho. La presa presenta tres niveles o terrazas. En la presa se vertían los LF del tratamiento de menas de sulfuros (pirita, esfalerita y galena) en forma de diseminaciones, especialmente en los niveles de areniscas y conglomerados, así como diferentes filones mineralizados (Diccionario, el Lirio, el Bosque, etc.)

asociados a las zonas de fracturas y fallas. Las menas provenían de la minería subterránea por galerías. Estos filones mineralizados se encuentran en materiales del Mioceno, en su parte superior, y en materiales del Paleozoico en la inferior (Manteca y Ovejero, 1992). La potencia media de los LF provenientes de la explotación y almacenados en la presa varía entre 35 y 40 m. La inclinación media del talud es de 35 a 40 grados. Los LF descansan sobre materiales del Mioceno (Serravalliense). Dichos materiales son limolitas calcáreas, alternando con areniscas, con algunas intercalaciones de conglomerados.

Depósito 2: Presa Brunita (BR)

Está ubicada al norte de la Mina Brunita, en el paraje conocido como La Esperanza, inmediatamente al sur del cementerio de La Unión. En esta presa se vertían los LF procedentes de la mina Eloy y Brunita. La Mina "Brunita" realizaba sus labores en el llamado Primer Manto mientras que la Mina Eloy lo hacía en el conocido como Segundo Manto. Los mantos son una clasificación local para reconocer la mineralogía asociada a los depósitos atendiendo a su mineralogía. El Primer Manto se denomina en este sector de la Sierra Minera de Cartagena La Unión "Manto Piritoso" (asociación clorita-sulfuros-carbonatos-sílice). Este manto se caracteriza por contener como sulfuros principales pirita, esfalerita, galena, marcasita y pirrotina y, como accesorios, calcopirita, arsenopirita, tetraedrita y estannina, con siderita como principal carbonato (López *et al.*, 1986). El segundo manto esta compuesto mayoritariamente por galena y esfalerita.

El material de la fundación (sustrato) de este depósito está formado por varios materiales: una parte está sobre esquistos grafitosos y cuarcitas grises paleozoicas del Complejo Nevado-Filábride, especialmente la parte occidental y, en parte, sobre calizas y filitas del Complejo Alpujárride que, a su vez, reposan en discordancia, por cabalgamiento, sobre los citados materiales paleozoicos.

Depósito 3. Presa Cuesta de Las Lajas (CL)

Se encuentra situado al sur de la estación de FEVE de la ciudad de La Unión, en la parte baja del valle que arranca del paraje de la Cuesta de Las Lajas. Los LF corresponden a los estériles del lavadero San Isidoro, que pertenecía a la empresa Minera Celdrán, donde se trataban los minerales de la mina Pablo y Virginia, entre 1946 y finales de la década de los 60 (Manteca *et al.*, 2000). En dicha mina, situada en la Cuesta de

Las Lajas, se explotaba el "Segundo Manto" en su variedad de "Manto Piritoso", dado que era éste el mineral predominante, acompañado de esfalerita y galena. Este depósito descansa sobre un delgado manto coluvial que recubre ligeramente a los esquistos grafitosos paleozoicos del complejo Nevado-Filábride, que afloran en las laderas circundantes. Este depósito está reforestado (Figura 6), aunque también se ve afectado por procesos de erosión.

Belleza. En dicha mina, situada en el macizo del Sancti Spíritu, se explotaba el llamado "Segundo Manto" en su variedad de "manto piritoso", dado que la pirita era el mineral predominante, acompañado en esta zona por abundante magnetita y por esfalerita y galena. Este depósito descansa en su parte sur sobre los esquistos grafitosos paleozoicos del complejo Nevado-Filábride, que afloran en las laderas del cerro del Sancti Spíritu y, en su parte norte, sobre los coluviones cuaternarios del pie de monte.

Depósito 4. Presa El Descargador (ED)

Se encuentra situado al este de la ciudad de La Unión, aproximadamente a un kilómetro, en el paraje conocido como El Descargador, apoyado sobre la parte inferior de la ladera norte del macizo de Sancti Spíritu; por debajo de las edificaciones del antiguo lavadero Virgen del Carmen, que dio origen a este depósito. Al norte se encuentra la carretera de La Unión a El Llano del Beal, la línea de ferrocarril de FEVE y los relieves del cabezo de El Descargador. Los LF corresponden a los estériles del lavadero Virgen del Carmen, que pertenecía a la empresa Minera Celdrán. Los LF son resultado del beneficio de la mina

Depósito 5. Presa Encontrada Cartagena (EC)

Se encuentra situado a unos ochocientos metros al oeste del núcleo urbano de El Llano del Beal, cerca del paraje denominado Collado de Las Tinajas, apoyado sobre la parte inferior de la ladera noreste del macizo del Cabezo de Don Juan, e inmediatamente al sur de la línea del ferrocarril de FEVE y de la carretera de La Unión a El Llano del Beal. Los LF corresponden a los estériles del lavadero Segunda Paz, actualmente desaparecido y que perteneció a la empresa Francisco Celdrán, y que se encontraba aproximadamente a un kilómetro al sur, en el denominado "Barranco del

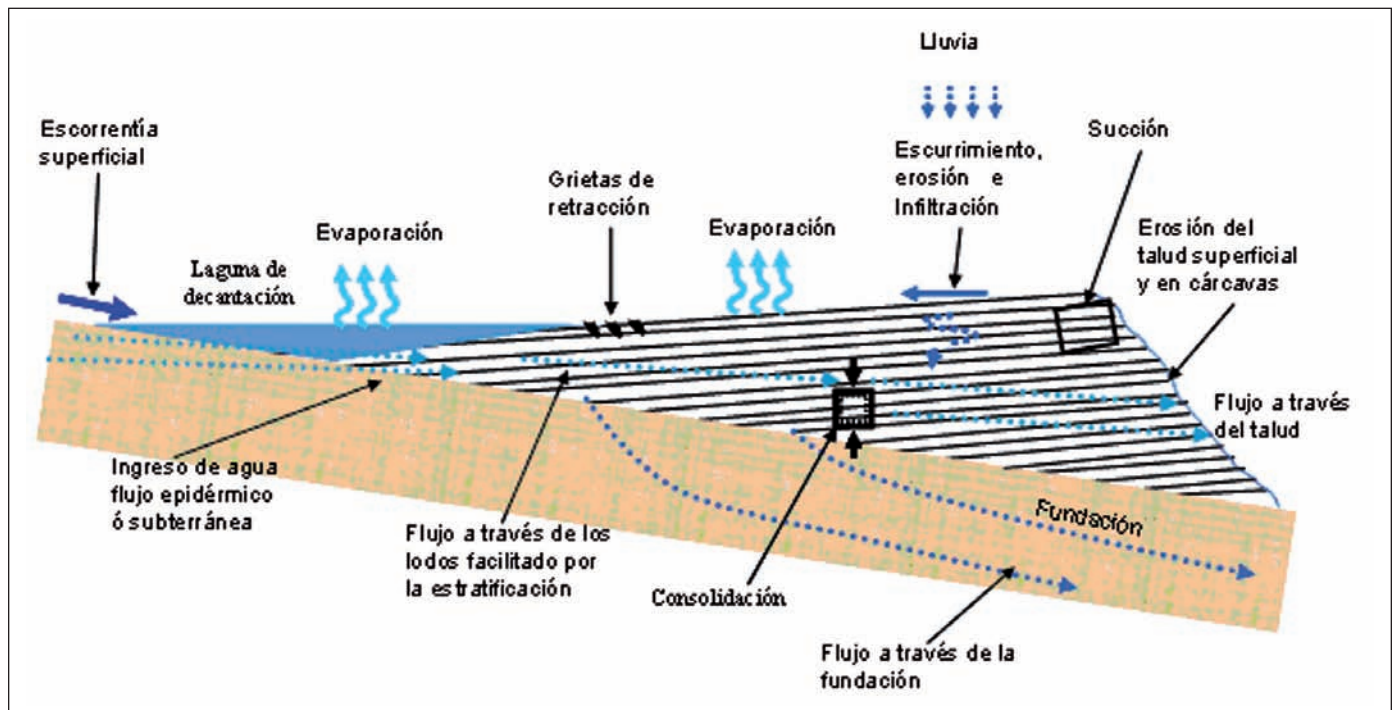


Figura 5. Modelo conceptual de las presa de LF de la Sierra Minera de Cartagena –La Unión, indicando los diferentes factores y fenómenos que afectan su funcionamiento
 Figure 5. Conceptual model of the tailings dams, indicating the factors and phenomena affecting their operation in Sierra Minera de Cartagena –La Unión

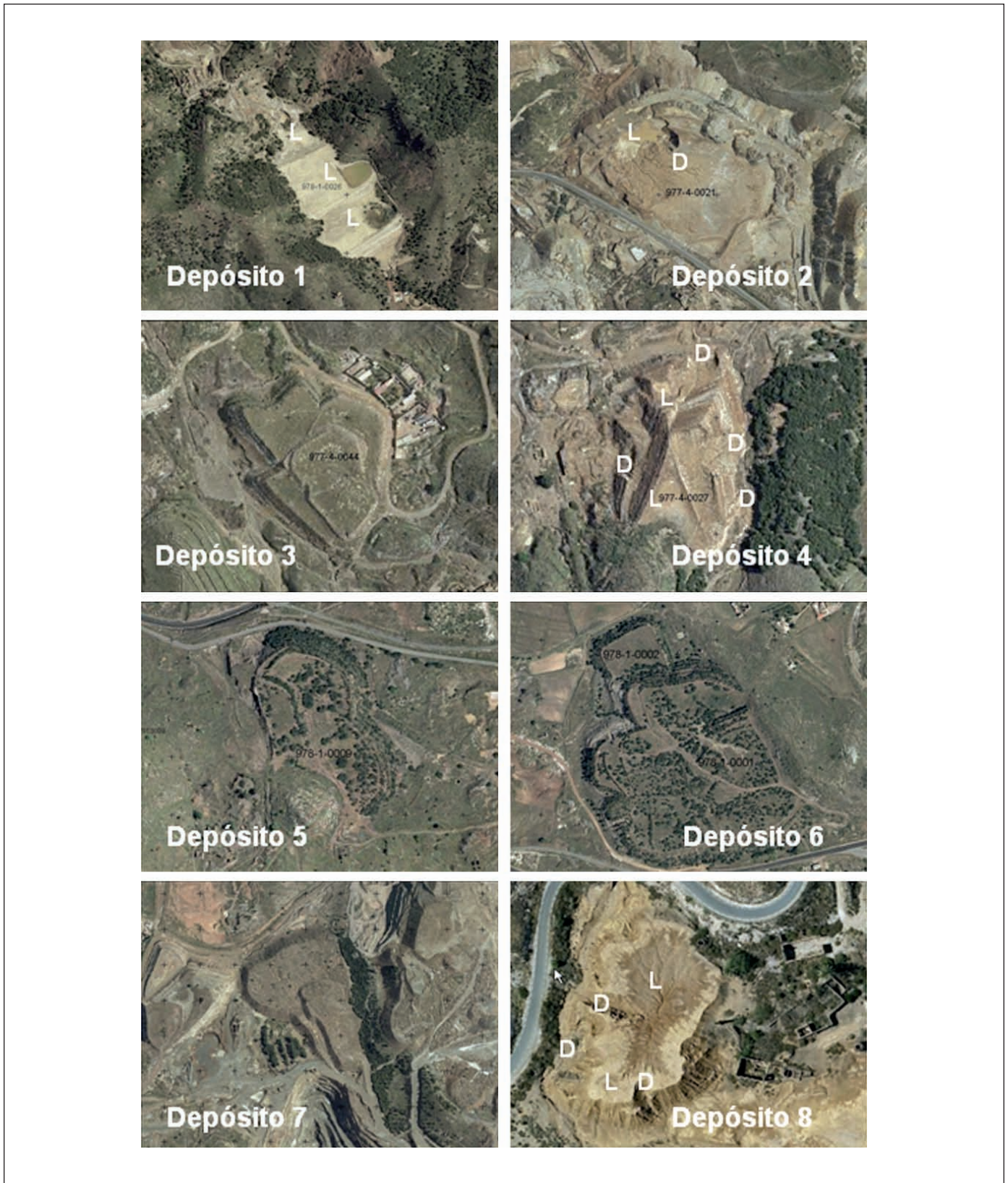


Figura 6. Fotografía aérea 2000 de las presas de lodos de flotación estudiadas: D: deslizamientos, L: laguna de decantación, C: subsidencia o colapso

Figure 6. Aerial photograph (2000) of the tailings impoundments studied: D, slope slides; L, pond; C: subsidence or collapse

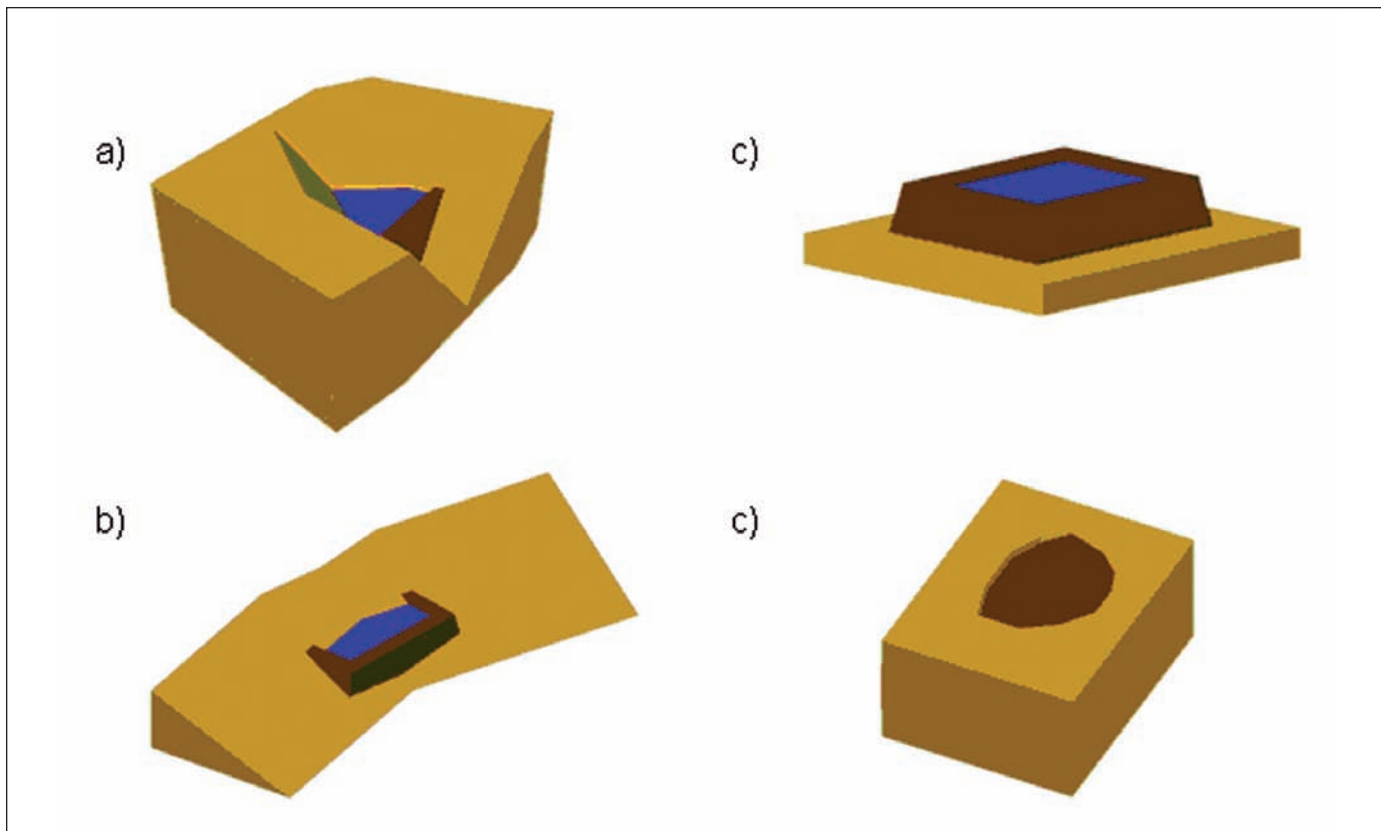


Figura 7. Tipos de depósitos de acuerdo al lugar de emplazamiento: a) en valle, b) ladera, c) llano y d) corta
 Figure 7. Types of tailings dams depending on topography: a) cross-valley; b) slope; c) flat; d) open pit

Francés". En dicho lavadero, se trataban los minerales de diferentes minas (Segunda Paz, Mendigorria, Buen Consejo, Julio César). También se trataban minerales marginales comprados a Peñarroya, procedentes, sobre todo, de la corta San Valentín. Los LF se apoyan sobre una ladera de dolomías triásicas y su base descansa sobre coluviones cuaternarios, muy antropizados aquí, por abundancia de antiguos residuos mineros de gravimetría. Debajo de los coluviones subyacen calizas triásicas de la unidad geológica de San Ginés. Este depósito está reforestado (Figura 6), aunque también lo afecta la erosión.

Depósito 6. Presa Encontrada Ponce (EP)

Está situado a unos setecientos metros al noroeste del núcleo urbano de El Llano del Beal, inmediatamente al norte de la carretera de La Unión a El Llano del Beal, y entre ésta y el paraje de "Mina Blanca", adosado al este de un cerro aislado. Es una de las mayores presas de LF de la SMCU. Los LF corresponden a los estériles del lavadero de Segunda Paz,

actualmente desaparecido y que perteneció a la empresa Francisco Celdrán, que se encontraba aproximadamente 1,3 kilómetros al sur, en el denominado "Barranco del Francés". En dicho lavadero, se trataban los minerales de diferentes minas (Segunda Paz, Mendigorria, Buen Consejo, Julio César). También se trataban minerales marginales comprados a Peñarroya, procedentes sobre todo de la corta San Valentín. Los LF se apoya, en su parte este, sobre un cerro aislado, constituido por calizas tableadas gris- azuladas del Trías, con intercalaciones de sills de doleritas, que pertenecen al Complejo Alpujarride Inferior o "Unidad de San Ginés", también se apoya parcialmente en filitas de dicha unidad. La base y el lado oeste del depósito, que queda libre hacia la zona de "Mina Blanca", descansan sobre rellenos cuaternarios, gravas y limos rojizos, con costras calcáreas. Bajo el Cuaternario subyacen esquistos nevado-filábrides. El limite oriental del depósito coincide aproximadamente con la traza de una falla llamada "El Bosque" (Dirección N-130°). Esta falla pasa a su vez por el límite de la corta Los Blancos III y llega hasta la costa. Según su emplaza-

miento es de tipo "en ladera. Este depósito esta reforestado (Figura 6), aunque también lo afecta la erosión.

Depósito 7. Presa Llano del Beal (LB)

Se encuentra situados a unos 500 metros al este del núcleo urbano de El Llano del Beal, cerca del borde norte de la gran corta minera Sultana o Los Blancos III e inmediatamente al este de la mina Lucrecia. Este depósito de lodos corresponde a los estériles de flotación del lavadero de Minas de Cartes, actualmente desaparecido y que perteneció a la empresa de dicho nombre, filial de la Compañía Asturiana de Minas. Este depósito descansa en su mitad occidental sobre coluviones del Cuaternario, gravas gruesas con matriz arcillosa, muy contaminadas con residuos mineros, que a su vez reposan sobre argilitas, areniscas y margas del Mioceno. En su mitad oriental el depósito descansa sobre esquistos grafitosos y cuarcitas grises del Paleozoico. Al este y sobre el nivel de este depósito, se hallan las grandes escombreras de estériles de mina de la corta Los Blancos.

Deposito 8. Presa "El Gorguel" (EG)

Está situado en la cabecera de la Rambla el Gorguel. Este depósito almacena los lodos de flotación provenientes del lavadero situado a unos cincuenta metros de la presa. En esta balsa se realizó el estudio del peso específico por capas estratificadas de los lodos

en la laguna de decantación. Los materiales descansan sobre calizas. De acuerdo a su emplazamiento, es de tipo ladera.

Materiales

Para la cartografía de las presas de los LF lodos se han empleado las fotografías aéreas correspondientes a los siguientes vuelos: 1) vuelo de 1956 a escala 1:33.000 (Centro Cartográfico y Fotográfico del Ejército del Aire. Ministerio de Defensa. Vuelo americano), 2) vuelo de 1964, a escala 1:10.000 (Instituto Geográfico Nacional). 3) Ortofoto 1998-2000 con resolución de píxel 1x1 m (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación).

Para la obtención de los parámetros geotécnicos se realizó la toma de muestras superficiales en ocho presas representativas. En siete presas se pudo realizar muestreo en profundidad, ya que se realizó un sondeo por presa con recuperación de testigo. Sobre las muestras tomadas se efectuaron los ensayos de identificación y caracterización geotécnica. En la Figura 2 se puede observar la ubicación de las presas estudiadas y la distribución espacial de los diferentes tipos de residuos minero-metalúrgicos existentes en la SMCU. La perforación de los sondeos se efectuó con una batería de 101 mm de diámetro en los primeros tres metros de profundidad, continuando con batería de 86 mm de diámetro hasta completar el total del espesor de los LF y alcanzar el sustrato (fundación). El testigo de la perforación se recogió en cajas porta-testigos.

Depósito	1	2	3	4	5	6	7	8
Nombre local	El Lirio	Brunita	Cuesta de Las Lajas	El Descargador	Encontrada Cartagena	Encontrada Ponce (Marqués de Pejas)	Llano del Beal	El Gorguel
No. Inventario IGME 2002	283910039	273940085		273940103	283910070	283910008	283910025	273940079
Coordenadas								
X	692750	686500	687950	688760	690380	690350	691800	687299
Y	4165040	4164800	4165260	4165700	4166500	4.166.950	4166450	4162442
Z (m)	180	160	160	190	135	125	120	65
Altura (m)	40-50	20-25	20-25	30-35	20-25	20-25	15-20	10-14
Área (ha)	9,82	3,85	2,75	2,46	3,85	16,5	8,82	3,2
Volumen almacenado (Mm³)	0,96	1,08	0,12	0,18	0,09	1,13	1,8	0,2
Inclinación del talud	34-50	35°-60°	35°-40°	30°-47°	35-43	30°-40°	35°-45°	37° -48°

Tabla 1. Principales características de las presas de lodos de flotación
Table 1. Main characteristics of the tailings ponds

Métodos

Granulometría

Los procedimientos estándar para la realización de este ensayo siguen la norma británica 1377 (BS, 1975), ensayos 7A y 7B, y la ASTM (2004), ensayo D-422-63.

Índice de Plasticidad (IP)

La determinación de la plasticidad se realiza mediante los llamados límites de Atterberg, que son, fundamentalmente, el límite líquido (LL), el límite plástico (LP) y, por diferencia entre ambos (LL-LP), el índice de plasticidad (IP). Los métodos estándar para su determinación se describen en la norma British Standard (BS) 1337 (1990) y ASTM (2004).

Permeabilidad

Se han llevado a cabo ensayos para determinar la permeabilidad saturada (k) *in situ* y otros en el laboratorio. Para los ensayos *in situ* se utilizó el método Gilg-Gavard. El procedimiento de ambos ensayos se recoge en las normas ASTM (2004). Éste se realizó en el interior de los sondeos, por el método de carga variable.

Humedad

La humedad de las muestras se ha determinado de acuerdo al procedimiento establecido en la norma British Standard (BS) 1337:1990.

Resultados

Granulometría de los LF

La granulometría de los LF estudiados puntualmente en las presas entra en la denominación de material mayoritariamente limo arenoso con una pequeña fracción de partículas arcillosas. Esta fina granulometría y la deforestación de la superficie facilitan los procesos de meteorización físico-química y, con ello, la erosión hídrica y eólica. Según los resultados, todas las muestras tienen más de un 50% de material fino inferior a 75 micras (Tabla 2).

Niveles de oxidación del perfil de los LF

La superficie de los LF, en la mayoría de las presas, presenta un color ocre que muestra la presencia de óxidos de hierro, mayoritariamente, así como eflorescencias debido a la precipitación de sulfatos, resultados de la oxidación de los sulfuros (Figura 4). En muchos casos estos minerales neoformados se encuentran rellenando las grietas de desecación.

Como se puede apreciar en la Figura 8, el nivel o grado de oxidación de los LF en el perfil vertical disminuye con la profundidad. En el caso de la imagen que se muestra, se puede comprobar dicha propiedad por el cambio de coloración del testigo extraído en uno de los sondeos. El primer metro presenta una coloración ocre rojiza debido a la oxidación de los minerales de hierro. A partir del primer metro se puede comprobar cómo el material presenta variadas tonalidades y es deleznable debido a la baja humedad y su granulometría limo-arenosa. Pasados los tres metros el material presenta un color gris muy uniforme, similar al color original de los LF vertidos en la

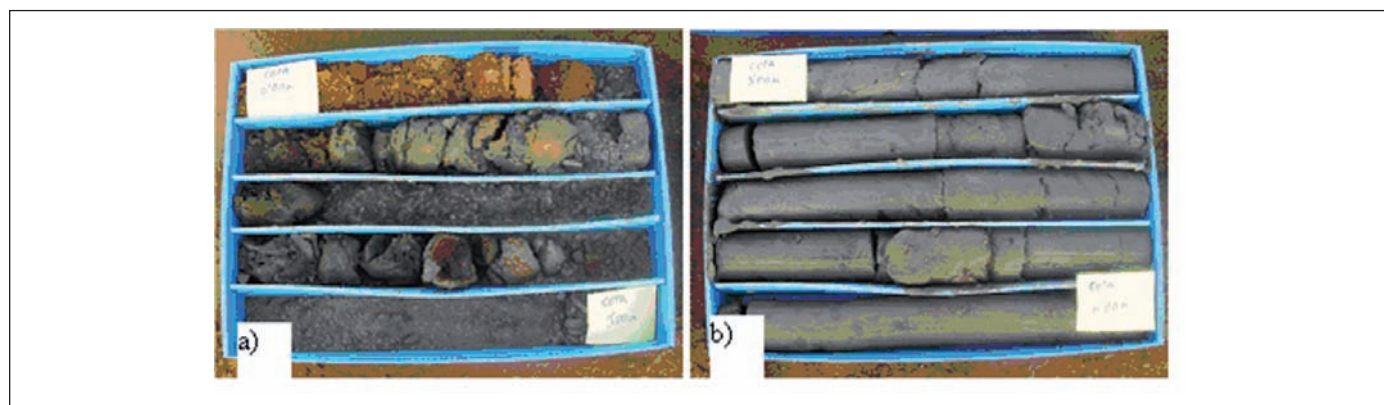


Figura 8. Oxidación de los lodos de flotación en la presa Brunita: a) 0-3 m, b) 3-6 m
Figure 8. Oxidation of tailings stored in the Brunita tailings pond: a) 0-3 m; b) 3-6 m

presa. El material está prácticamente saturado en profundidad (Tabla 3).

Estratificación de los LF

En la Figura 4 se puede apreciar la estratificación de LF en las presas. El espesor de las capas es de centimétrico a milimétrico. Además, en la misma figura se observan una gran variedad de tonalidades de colores del ocre al gris verdoso como muestra de los diferentes grados de oxidación a que está sometido el material. Estas capas con diferentes ángulos de inclinación, estratificación variada y diferentes granulometrías, son un indicativo de que el vertido del lodo en la balsa se desarrolla en diferentes etapas y desde diferentes puntos, condición que favorece el desarrollo de la sedimentación diferencial y la acción de los agentes oxidantes sobre las partículas del mineral, así como los procesos de estratificación, que dan lugar a paleocanales y estratificación cruzada, y el desarrollo de procesos erosivos en el interior del depósito (Figura 4).

Clasificación de los LF de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos (SUCS)

Aunque el SUCS es un instrumento de clasificación de los suelos usado en la geotecnia clásica, en nuestro caso se ha utilizado para caracterizar y clasificar los diferentes LF estudiados. De acuerdo con el SUCS, los diferentes LF estudiados son mayoritariamente limos arenosos. Como se puede observar en la carta de Plasticidad de Casagrande (Figura 9, Tabla 3) todas las muestras que presentan plasticidad se agru-

pan en torno a la Línea A. Considerando los valores obtenidos del IP se puede decir que todos los LF estudiados en profundidad, se clasifican de acuerdo a la carta de plasticidad como limos arenosos inorgánicos con diferentes adjetivos (CL, MH, ML, ML-CL). Las muestras CL corresponden a un limo arcilloso con ligera plasticidad. Los materiales clasificados como MH son un limo arenoso de composición inorgánica y una plasticidad media. El material ML son limos inorgánicos y arena muy fina con ligera plasticidad. Considerando el valor del Limite Líquido los LF se dividen en dos grupos según Lambe y Witman (1990): 1) Limos arcillosos con límite líquido menor de 50 y 2) Limos arcillosos con límite líquido mayor de 50 (Depósitos 3 y 5).

La existencia de índices de plasticidad tan bajos en la mayoría de los materiales y la presencia de material no plástico es un aspecto a tener en cuenta, ya que los materiales no plásticos de naturaleza limo-arenosa presentan propiedades licuefactables (Rodríguez, 2006). En los valores de los índices de Atterberg queda también plasmada la heterogeneidad de los LF existente en las presas de la SMCU.

Densidad de las partículas sólidas de LF

En la Tabla 3 se puede comprobar la variabilidad espacial en profundidad de la densidad de las partículas sólidas. En la Figura 10 se muestran los valores que corresponden a los análisis de una muestra en bloque extraída de la laguna de decantación de la presa El Gorguel. La muestra estaba compuesta por 24 capas de espesores centimétricos o milimétricos. Cada uno de los puntos representa una capa dentro del depósito. La densidad de las partículas sólidas varía entre 1,8 y 3,8 g/cm³. En la Tabla 3 se puede comprobar que este parámetro es muy variable para todas las muestras de LF estudiadas en profundidad y en superficie de diferentes presas. El elevado peso específico está condicionado por la composición de los LF, donde hay grandes cantidades de metales pesados (García, 2004).

Parámetros de resistencia de los LF

Normalmente, en la caracterización de los suelos y, específicamente, en los estudios de presas de LF, se determinan los parámetros de resistencia de los materiales: cohesión (c) y ángulo de fricción interna (φ), elementos claves para poder estudiar y analizar la estabilidad geotécnica de los taludes, y de la presa en su conjunto. En este caso, la información existente

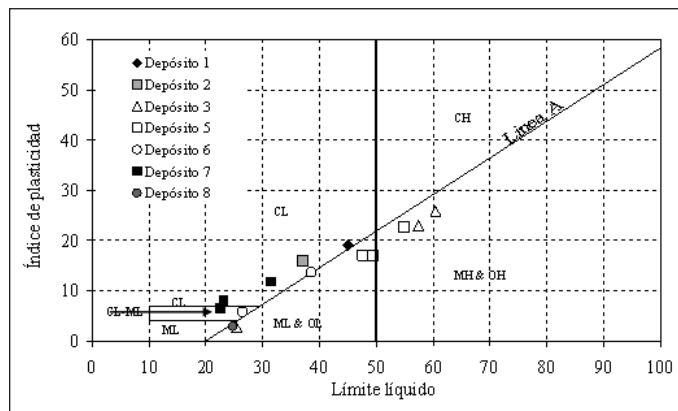


Figura 9. Carta de plasticidad de Casagrande
Figure 9. Plasticity chart of Casagrande

Depósito	1			2			3			4			5			6			7			8			
Nombre muestras	EL1	EL2	EL3	BR1	BR2	BR3	CL1	CL2	CL3	ED1	ED2	ED3	EC1	EC2	EC3	EP1	EP2	EP3	LB1	LB2	LB3	G1	G2	G3	
Profundidad (m)	4,1	8,1	12,1	2,1	7,7	12	3,1	5,9	9,2	0,1	2	4,1	4,1	8,1	8,5	6,6	11,5	14	5,3	7,5	13,1	5,3	7,5	3,2	
Abertura tamiz (mm)	% que pasa																								
2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0,6	100	100	100	100	100	100	98,8	100	100	89,1	97,2	98,7	100	99,8	100	100	100	100	75,8	100	100	95,8	100	100	100
0,3	100	99	100	95	98	89	97,7	100	99,8	79,8	87,3	91,3	99,8	98,8	99,4	100	100	100	61,8	100	99,8	71,2	100	92,8	92,8
0,15	91,2	92,1	95,6	93	96	71	88,3	99,8	98,6	75,5	81,1	86,5	99,4	94,8	98,2	98,1	86,4	91,2	68,3	79,7	85,9	75,1	89,1	88,3	88,3
0,075	78,7	76,2	90,1	75	89	63	75,3	99,6	97,8	69,9	78,2	65,4	99	91,9	97	73,6	79,9	64,3	59,7	65,5	64,2	66,7	69,5	66,8	66,8

Tabla 2. Granulometría de los lodos de flotación almacenados en las presas. Nombre de las muestras tomadas en las presas de residuos. EL: El Lirio, BR: Brunita; CL: Cuesta las lajas, ED: El Descargador, EC: Encontrada Cartagena, EP: Encontrada Ponce, LB: Llano del Beal y G: Gorguel

Table 2. Gran sizes of tailings stored in the tailings ponds. Abbreviations of the samples collected from the tailings ponds: EL: El Lirio; BR: Brunita; CL: Cuesta Las Lajas; ED: El Descargador; EC: Encontrada Cartagena; EP: Encontrada Ponce; LB: Llano del Beal; G: Gorguel

(Tabla 3) confirma la gran variabilidad de las propiedades de los LF de la SMCU. La cohesión es baja, entre 0 y 2,2 t/m². El ángulo de fricción interna varía entre 25 y 42 grados. Las muestras de LF que presen-

tan mayor ángulo de fricción son las de la presa Las Lajas con 42 grados. Las muestras de menor ángulo de fricción son las del depósito Encontrada 1 con un valor de 25 grados. Las muestras de LF que presentan

Depósito	Nombre local	No	H(m)	w	S	n	γs(g/cm ³)	Gs(g/cm ³)	LL	LP	IP	C(t/m ²)	Φ	k(m/s)
1	El Lirio	1	4,10	0,18	0,93	0,36	1,86	2,9		Np	Np			
		2	8,10	0,19	1,00	0,35	1,80	2,89		Np	Np	0,93	32	
		3	12,10	0,27	0,72	0,44	1,60	2,1	45	26	19	1,32	28	7,91x10 ⁻⁶
2	Brunita	1	1,10	0,14	0,90	0,32	1,79	3,01		Np	Np	0,93	32	
		2	7,70	0,27	0,71	0,49	1,50	2,52	37	21	16	1,32	28	6,05x10 ⁻⁷
		3	11,6	0,15	1,00	0,32	1,78	3,2		Np	Np	2,05	34	
3	Las Lajas	1	3,10	0,25	0,79	0,48	1,51	2,91	25,4	22,7	2,7	0	42	
		2	5,90	0,23	0,75	0,47	1,53	2,89	60,4	34,5	25,9	0	42	
		3	9,20	0,31	0,63	0,53	1,49	2,29	57,4	34,4	23	0	42	2,41x10 ⁻⁵
4	Descargador	1	2,35	0,26	0,68	0,54	1,65	3,05	28	Np		0	32	
5	Encontrada 1	1	4,10	0,25	0,35	0,59	1,83	2,02	54,9	32,2	22,7	2,05	25	
		2	8,10	0,28	0,71	0,47	1,72	2,25	47,6	30,5	17,1	0,93	32	4,07x10 ⁻⁶
		3	8,50	0,31	0,73	0,49	1,55	2,25	49,4	32,4	17	2,10	29,8	
6	Encontrada 2	1	6,60	0,29	0,67	0,55	1,66	2,8	26,4	20,6	5,8	2,24	32	
		2	11,45	0,31	0,68	0,49	1,70	2,1	38,5	24,8	13,7	1,32	28	2,16x10 ⁻⁵
		3	13,95	0,19	1,00	0,38	1,99	3,21		Np	Np	0,93	32	
7	Llano del Beal	1	5,30	0,24	0,70	0,47	1,54	2,90	31,5	19,7	11,8	0,45	25	1,82x10 ⁻⁷
		2	7,50	0,36	0,78	0,53	1,48	2,49	23,1	15	8,1	0,35	25	
		3	13,10	0,37	0,95	0,54	1,64	3,01	22,5	16	6,5	0,35	25	
8	Gorguel	24	0,0-0,30	0,12	0,61	0,63	1,22	3,32	24,7	21,8	2,9	0,13	34	2,01x10 ⁻⁷

Tabla 3. Media de las principales características físicas y mecánicas de los lodos de flotación. No: número de muestras, H: profundidad, w: humedad gravimétrica, S: grado de saturación, γs: densidad seca, Gs: densidad de las partículas sólidas, LL: límite líquido, LP: límite plástico, IP: índice de plasticidad, Φ: ángulo de fricción interna, k: conductividad hidráulica saturada

Table 3. Average of the main physical and mechanical properties of the tailings: No, number of samples; H, depth; w, gravimetric moisture; S, degree of saturation; γs, dry density; Gs, density of solid particles; LL, liquid limit; LP, plastic limit; IP, plasticity index; Φ, internal friction angle; k, saturated hydraulic conductivity

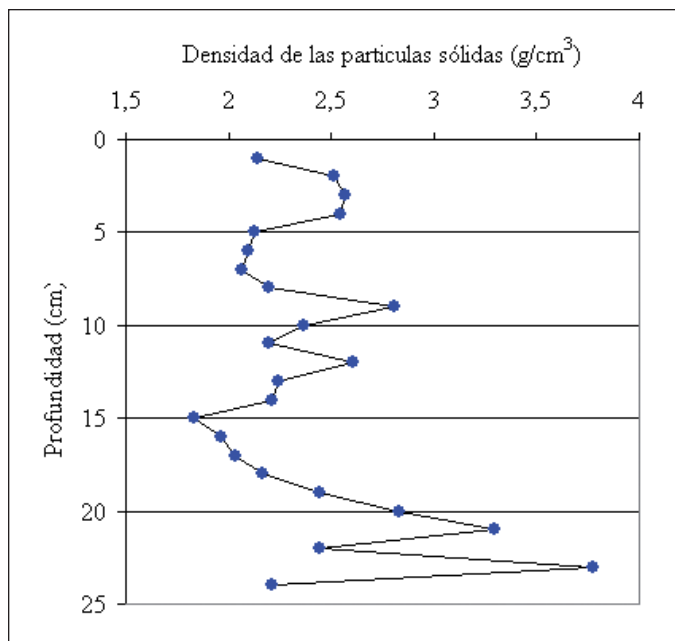


Figura 10. Densidad de las partículas sólidas por capas de lodos en la presa El Gorguel
 Figure 10. Specific gravity of solid particles according to layer in the El Gorguel tailings pond

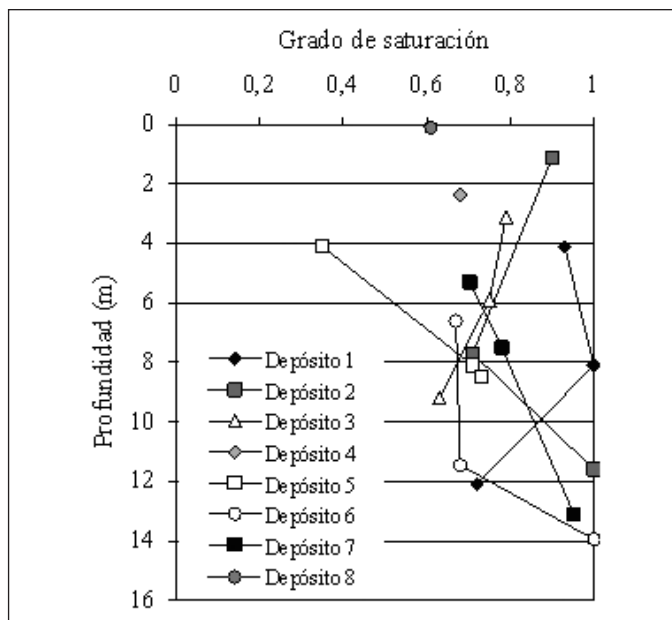


Figura 11. Perfiles de grado de saturación obtenidos en las presas de lodos de flotación en Sierra Minera de Cartagena –La Unión. Símbolos llenos: depósitos sin vegetación. Símbolos vacíos: depósitos con vegetación
 Figure 11. Profiles of the degree of saturation in samples from the Sierra Minera de Cartagena –La Unión tailings ponds. Black symbols: deposits without vegetation; open symbols: deposits with vegetation

ángulo de fricción y cohesión se clasifican como cohesivos-friccionantes, mientras que las que no tienen cohesión se clasifican como friccionantes. El hecho de que los LF presenten un ángulo de fricción elevado, se debe a que son el producto del machaqueo de una roca dura y se caracterizan por presentar una morfología de las partículas muy angulosa e irregular.

Humedad y saturación de los depósitos de LF

Los perfiles de los depósitos de LF de la SMCU muestran valores bajos de humedad cerca de la superficie y, por ende, del grado de saturación (S), aumentando rápidamente en los primeros 2-3 metros de profundidad. En cuatro de los ocho depósitos, S se hace mayor a 0,7 a partir de los tres metros de profundidad y continúa siendo elevado hasta el fondo de la perforación (Figura 11 y Tabla 3). Es interesante notar que los tres perfiles con valores de S inferiores a 0,7 para profundidades mayores a tres metros, corresponden a depósitos con vegetación (Depósito 3: arbustos, Depósitos 5 y 6: árboles, Figura 6). Algunos perfiles muestran valores de S próximos a 1, si bien en nin-

gún caso se detectó un nivel freático en el interior del depósito. Además, según los estudios hidrogeológicos de la zona, el nivel freático está a varias decenas de metros de profundidad (García, 2004). Los perfiles de lodos con mayor grado de saturación corresponden a depósitos sin vegetación y en los que se observó que el agua de lluvia se encharcaba en la superficie y fundamentalmente en la laguna de decantación (Figura 6).

Conductividad hidráulica saturada (permeabilidad) de los LF

Los LF estudiados se caracterizan por una permeabilidad saturada entre 10^{-5} y 10^{-9} m/s. La permeabilidad medida *in situ* siempre es mayor que la medida en el laboratorio. Los ensayos de permeabilidad hidráulica saturada en el laboratorio en condiciones de compactación (ensayos Próctor), han arrojado los siguientes resultados: los LF del depósito Las Lajas alcanzan un valor de $6,7 \times 10^{-9}$ m/s. En el caso de los LF de El Descargador, el resultado es $2,1 \times 10^{-8}$ m/s. Estos resultados confirman que los LF en condiciones homogéneas se comportan como de baja permeabilidad.

Estos resultados son coherentes con los obtenidos por Rodríguez (2002 y 2006).

Inestabilidad geotécnica de los LF

Al analizar los procesos de inestabilidad geotécnica se considera el conjunto de las 89 presas y la única balsa cartografiadas en la SMCU. Los principales procesos de inestabilidad geotécnica observados en las presas de LF están asociados a su funcionamiento hidráulico (Figura 5), entre ellos se pueden señalar: colapso, deslizamientos, erosión en cárcavas y erosión del pie del talud.

El colapso de los LF

Ha sido observado en la presa Marqués de Pejas y la balsa Tomasa (Figura 12a y 12b). El colapso, al parecer, puede tener dos orígenes: la subsidencia generada por antiguas explotaciones mineras de interior existentes en la fundación a diferentes profundidades, ó bien debido a la infiltración de aguas ácidas y la disolución de la capa de carbonatos (calizas, margas, dolomías, caliches) existentes en la base de muchas presas.

Deslizamientos de los LF

El deslizamiento de los lodos se ha observado en varias presas; el más grande en cuanto a volumen es el de la presa Brunita (Figura 12c), el cual tuvo lugar después de una lluvia torrencial de 72 mm en el año 1972, cuando aun la presa estaba en activo. En la presa El Descargador han sido cartografiados cinco pequeños deslizamientos (Figura 6 y 12), provocados mayoritariamente por la erosión hídrica en el pie del talud y el desbordamiento, pues en la parte superior se pueden observar dos lagunas de decantación donde se acumula el agua de lluvia. En la presa Peña del Águila (Figura 12d) también existe un deslizamiento de cierta consideración, ocasionado por la erosión hídrica provocada por el sobrepaso del agua sobre la superficie del talud, debido a la acumulación de agua en la laguna de decantación y su desbordamiento.

A pesar de los procesos de inestabilidad observados en el terreno, hay que tener presente que la mayoría de las 89 presas de LF existentes en esta región se mantienen "estables" por la cohesión aparente que les otorga el agua capilar y, probablemente, por algo de cementación debida a las sales de sul-

atos precipitadas en los primeros centímetros de la superficie. En las zonas agrietadas este proceso puede alcanzar los primeros metros de la superficie al evaporarse parte del agua contenida en los LF, o por infiltración de lluvia durante los procesos de escorrentía superficial, pues la mayoría de estos emplazamientos actúan como una cuenca endorreica, cuyo centro de acumulación del agua de lluvia y la de escorrentía es la laguna de decantación (Figura 5). La pendiente de los taludes que conforman las presas de LF varía entre 20° y 60°, con un valor más frecuente entre 35° y 40°, superior en algunos casos al ángulo de fricción interna (Tabla 3). La humedad en el interior de estos depósitos no es tan baja como pudiera parecer a primera vista, con valores entre el 15 y el 30% (Tabla 3). Mediciones sobre muestras de sondeos realizados en siete de estos depósitos en profundidad, han dado valores de índice de saturación entre 75 y 80% (García, 2004, Oldecop *et al.*, 2010). Sin embargo, la humedad en la superficie del talud es mucho menor. El grado de saturación en el primer metro de espesor está entre el 40 y 60% (Figura 11 y Tabla 3). Estos valores de humedad se mantienen en el tiempo, fundamentalmente debido al clima semiárido (precipitación media anual de 339 mm), que favorece que los taludes de las presas de LF sean estables. Comparando el ángulo de inclinación de las presas (entre 35° y 40°), con el ángulo de fricción interna (entre 25° y 42°) y teniendo en cuenta la baja cohesión de los materiales, se podría afirmar que la estabilidad es mínima. Sin embargo, el hecho de que los taludes estén en condiciones no saturadas les confiere una mayor estabilidad por succión.

Erosión de los LF

La erosión hídrica está presente en todas las presas de LF de la SMCU, restauradas o no (Figura 6 y 12). Es la causante del desarrollo de la erosión en cárcavas y de muchos de los deslizamientos existentes en las presas de LF, pues, al erosionar el pie del talud, provoca la pérdida de estabilidad de éste y la generación de pequeños y medianos deslizamientos, como los desarrollados en las presas El Descargador y Peña del Águila (Figura 6 y 12). Podría afirmarse que el problema de estabilidad más frecuente que tienen estas estructuras es el relacionado con la pérdida de material por erosión, debido a que las lluvias de la zona suelen ser de carácter torrencial, con elevadas intensidades de precipitación. Se han medido valores de erosión entre 2 y 8 kg/m² de LF en la presa Rosa, en un único episodio de lluvia de 60 mm (García, 2004). En la Figura 4 se aprecia, en un corte vertical, la

estructura estratigráfica singular, a base de capas de espesores muy variados, alternando material arenoso con limos. Se observa la tonalidad blanca de las

sales de sulfatos precipitadas en la pared del talud (Figura 3 y 4). El huso granulométrico de los LF así como mecanismos de sedimentación de baja energía,



Figura 12. a) Colapso de la presa Marqués de Peja, b) colapso de la presa Tomasa, c) deslizamiento presa Brunita, d) deslizamiento presa Peña del Águila, e) Sobrepasso presa El Lirio (11/04/2004) y f) erosión en cárcavas presa Rosa
Figure 12. a) collapse of the Marques de Peja tailings dam; b) collapse of the Tomasa tailings dam; c) landslide in the Brunita tailings dam; d) landslide in the Peña del Águila tailings dam; e) overflow of the El Lirio tailings dam (11/04/2004); f) badlands gully erosion at the Rosa tailings dam

facilitan la formación de estructuras internas poco compactas. Dichas estructuras permanecen en un estado de estabilidad precario, sustentado en parte por las sales. El aumento de humedad, debido a la escorrentía e infiltración, puede provocar el colapso interno de los materiales, facilitando su arrastre. El proceso de erosión de los LF está igualmente favorecido por el elevado ángulo de inclinación de las pendientes de las presas, no obstante, mientras se mantiene la condición no saturada, los procesos de erosión son mínimos.

Discusión

Excepto en los primeros metros de la capa superficial, el grado de saturación de los LF es relativamente elevado en las presas estudiadas (Figura 11 y Tabla 3). A pesar de la baja pluviometría de la zona, los lodos presentan una gran humedad en profundidad. Para profundidades mayores a dos metros, el proceso de secado no llegará más allá del punto localizado entre las condiciones de saturación y el valor de entrada de aire de la curva de retención de estos materiales, que se sitúa entre ($0,8 > S > 1$) (Rodríguez, 2006, Oldecop *et al.*, 2010). El ascenso del agua capilar y la precipitación de las sales en superficie del talud producen una cohesión aparente que asegura la estabilidad geotécnica de la mayoría de las presas estudiadas. Por lo tanto, la estabilidad de las presas de la zona depende de que se mantenga la condición no saturada de los lodos. Si este equilibrio se rompe debido al aporte de agua por la lluvia, que satura el material, se producirá la rotura o fallo de estas estructuras, tal y como ocurrió en la presa Brunita después de un intenso episodio de lluvia de 72 mm en 24 horas en el año 1972 (García 2004). Asimismo, se producirán deslizamientos debido a la erosión hídrica del pie del talud o al desbordamiento producido por la lluvia, como el de la presa El Descargador. El desbordamiento o sobrepaso de las presas de LF es frecuente porque éstas carecen de aliviadero o sistemas de drenaje. Éste se manifiesta en las épocas de eventos lluviosos intensos y en cortos periodos de tiempo, dando lugar al desarrollo de grandes cárcavas que afectan también la estabilidad del talud.

Los casos históricos de fallos de presas de LF activas y abandonadas (Chandler y Tosatti, 1995, Bligh, 1997, Fourie *et al.*, 2001, ICOLD, 2001, Bligh y Fourie 2003) muestran que una de las variables más significativas en relación con la estabilidad de los presas de LF es la humedad de éstos en el interior del depósito. Muchos de los fallos de depósitos de LF descritos en la bibliografía (ICOLD, 2001), estuvieron relacionados

con lluvias, previsiones de drenaje insuficientes o un manejo inapropiado del agua almacenada en la laguna de decantación. Además, la gravedad de las consecuencias del fallo de una presa de LF también está relacionada con la humedad de los LF. La mayor parte de las avalanchas de lodos, de consecuencias ambientalmente catastróficas, ocurrieron cuando la cantidad de agua almacenada junto con los LF era elevada, o bien, cuando circunstancias especiales en el manejo y gestión de los LF determinaron que grandes cantidades de agua ingresaran en las presas o balsas de lodos.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede afirmar que, un objetivo de diseño deseable y realista (tanto para las nuevas presas de los LF, como para la rehabilitación de las presas y balsas de LF abandonadas), sería no esperar un secado indefinido de los LF en el interior del depósito, sino alcanzar un valor de succión (y el correspondiente grado de saturación) cercano al valor de entrada de aire, S menor que 0,8 (Rodríguez, 2006). Para S superior a 0,8, se produce una drástica disminución en los parámetros resistentes, tanto a la rotura como a la erosionabilidad de los LF. Todos los trabajos de construcción y mantenimiento de las presas de LF deben ayudar a maximizar la relación escorrentía/infiltración para evitar la entrada de agua al interior de los LF. Para lograr esto es muy importante el manejo y gestión del agua durante el proceso de explotación y cierre de la presa y dejar implementado un sistema funcional que resista el paso del tiempo, si es que esto fuera posible. Hay que señalar que el drenaje del agua almacenada en los LF es un proceso difícil y costoso.

Los resultados muestran que la humedad de los LF es una variable fundamental para evaluar su comportamiento espacio temporal a medio y largo plazo y la seguridad ambiental de los depósitos. La evolución de la humedad debería ser tomada en cuenta en el diseño de las presas de los LF y en su monitoreo. Este aspecto, el de poder predecir el comportamiento a largo plazo (ej: 1000 años), presenta una gran limitación, y es que no se dispone de datos sistemáticos de la evolución espacio-temporal de la humedad de las presas de LF, ni de los cambios geomorfológicos que experimentan como resultado de la erosión, colapso, consolidación, licuefacción o deslizamiento.

Referencias

- A.S.T.M. (American Society for Testing of Materials). 1990. *Annual Book of ASTM Standards. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. D 422-63
- Bligh, G.E. and Fourie, A. B. 2003. A review of catastrophic flow failures of deposits of mine waste and municipal

- refuse. *International Workshop on occurrence and mechanisms of flow in natural slopes and earthfills*, Sorrento, Italia.
- Bligh, G. E. 1997. Destructive mudflows as a consequence of tailings dyke failures. *Proceeding of Internatioanl Civil Engineering*, 125, 9-18.
- Chandler, R. J and Tosatti, G. 1995. The Stava dams failure. Italy, July, 1985. *Proceeding of International Civil Engineering*, 113, 67-79.
- Directiva Europea 2006/21/CE. 2006. Sobre la gestión de los residuos de la industria extractiva. Diario Oficial de la Unión Europea 11/04/2006.
- Fourie, A.B., G.E. Bligh and G. Papageorgiou 2001. Static liquefaction as a possible explanation for the Merriespruit tailings dams failure. *Canadian Geotechnical Journal*, 38, 707-719.
- García, C. 2004. *Impacto y riesgo ambiental de los residuos minero-metalúrgicos de la Sierra de Cartagena-La Unión (Murcia- España)*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cartagena.
- ICOLD 2001. *Tailings dams. Risk of dangerous occurrences. Lessons learnt from practical experiences. Bulletin* 121, UNEP.
- Lambe T.W. y Whitman, R.V. 1990. *Mecánica de suelos*. Editorial Limusa. Segunda Edición. 582 pp.
- López García, J.A., Manteca J.I. y Austillo, J. 1986. Geoquímica de las zonas de oxidación de los yacimientos de Fe-Pb-Zn de la Sierra de Cartagena (SE de España). *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, 9, 367-373.
- Manteca, J.I. y Ovejero, G. 1992. Los yacimientos Zn, Pb, Ag, Fe del distrito minero de La Unión-Cartagena, Bética Oriental. Recursos Minerales de España. Textos universitarios, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 15, 1085-1102.
- Manteca, J.I., García, C. y Ródenas, F. 2000. *Ruta minera carretera del 33*. La Unión- Murcia. Excelentísimo Ayuntamiento de La Unión. Concejalía de Turismo y Museos. 33 pp.
- Oldecop, L.A., Garino, L., Muñoz, J.J., Rodríguez, R. y García, C. 2010. Comportamiento de colas mineras en climas áridos. *Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. CAMSIG 2010, Mendoza, Argentina*, 1-8.
- Real Decreto 975/2009. Boletín Oficial del Estado. Número 143. Sábado 13 de Junio 2009. 49948-49993.
- Rodríguez, R. y García-Cortés, A. 2006. *Los residuos minero-metalúrgicos en el medio ambiente*. Editorial: Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 1-744.
- Rodríguez, R. 2002. *Estudio experimental de flujo y transporte de cromo, níquel y manganeso en residuos de la zona minera de Moa (Cuba)*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona.
- Rodríguez, R. 2006. Hydrogeotechnical characterization of a metallurgical waste. *Canadian Geotechnical Journal*, 43, 1042-1060.
- Zandarín, M.T., Oldecop, L. A. Rodríguez, R. and Zabala, F. 2009. The role of capillary water in the stability of tailings dams. *Engineering Geology*, 105, 108-118.

Recibido: enero 2011
Revisado: febrero 2011
Aceptado: febrero 2011
Publicado: abril 2011