

PRESAS DE RESIDUOS MINEROS

Por JOSE LUIS BERZAL

Ingeniero de Minas.
M. Sc. en Mecánica de Rocas,
Imperial College, Londres.

INTRODUCCION

Las plantas de tratamiento de minerales de las explotaciones mineras dejan como residuos grandes cantidades de lodos de consistencia semiliquida que producen un grave problema de evacuación. La solución habitualmente empleada consiste en verter estos fangos en recintos adecuados formados con diques artificialmente contruidos, presas de residuos mineros o, en términos mineros, balsas de decantación.

En principio, el proyecto de estos diques se guía por la misma teoría que el de las presas de contención de aguas, pero presentan muchas peculiaridades. Principalmente, la diferencia estriba en que el agua es un material de condiciones simples y perfectamente definidas, mientras que los lodos de que hablamos tienen características resistentes y de consolidación a lo largo del tiempo muy complejas y, generalmente, mal conocidas. Por otra parte, la construcción de estos depósitos está íntimamente ligada con las producciones y los procesos de tratamiento de minerales: características granulométricas, producciones disponibles de las diferentes fracciones granulométricas, de concentración de sólidos, características físicas, mineralógicas y químicas de los residuos, etc., lo que hace que, en algunos casos, sea necesario recurrir a la construcción de verdaderas presas de tierra y, por el contrario, en otros, pueda realizarse su construcción por los métodos tradicionalmente empleados en minería.

Los accidentes acaecidos, en el pasado, en algunas de nuestras balsas, si bien no han sido numerosos y de graves consecuencias en general, han puesto de manifiesto la necesidad de un estudio y control sistemático. En efecto, la utilización de técnicas adecuadas de compactación, el establecimiento de eficaces sistemas de drenaje, el conocimiento previo de las características físicas y mecánicas de los residuos, el estudio detallado de su estabilidad, de los aspectos ambientales, etc., tienen una repercusión decisiva, no sólo en la seguridad y eficacia de estos depósitos, sino en la capacidad real de almacenamiento de los mismos.

Por otra parte, el creciente desarrollo económico e industrial y la expansión urbana de las ciudades en cuyas inmediaciones se encuentran implantadas estas estructuras mineras, obligan no sólo a mejorar el grado de estabilidad y seguridad de los mismos, sino que plantea otros aspectos importantes, como es el de su reexplotación como menas mineras o el de la recuperación —total o parcial— del espacio ocupado por los mismos

para otros usos posteriores, al menos como espacios verdes, o que puedan ser utilizados como parque de mineral, atravesados por vías de comunicación o incluso, con determinadas técnicas de cimentación, puedan ser edificadas. Asimismo, no debe olvidarse que el planteamiento y gestión de un gran depósito de esta naturaleza presenta problemas y aspectos secundarios que requieren un cuidadoso estudio, en el que la preservación del paisaje y los aspectos ecológicos en general, fundamentalmente respecto a los problemas de contaminación por los efluentes de estos depósitos de los cursos de agua naturales o subterráneos, son considerados ya en las etapas de diseño.

En este artículo más que presentar los ejemplos de diseño y construcción de las grandes presas mineras realizadas en los tres o cuatro últimos años, se ha considerado más conveniente exponer una serie de ejemplos que, por un lado, ofrecen una visión conjunta de la evolución que se ha experimentado en nuestro país respecto al diseño y construcción de estos depósitos, sin olvidar su íntima connivencia con el tipo de minería, naturaleza de los residuos, producciones, etc., con los condicionantes que todo ello lleva implícito y, por otro, presentar la transcendencia que representan los aspectos de recuperación del espacio ocupado por uno de estos recintos, restitución del paisaje y evaluación previa de la calidad de los efluentes de los mismos. Así, los seis primeros ejemplos son claros exponentes de esa evolución, en los que puede observarse desde presas que responden a diferentes necesidades y con diferentes métodos constructivos, hasta depósitos actualmente en sus estados iniciales de construcción o, incluso, de diseño.

El ejemplo presentado en séptimo lugar muestra un caso típico de la incidencia de uno de estos depósitos en determinadas obras de ingeniería civil. El presentado en octavo lugar, es un caso típico de recuperación del espacio ocupado por uno de estos recintos y restitución del paisaje y, finalmente, se expone un ejemplo de la evaluación preliminar de las aguas residuales de una futura presa de residuos mineros.

1. PRESAS DE RESIDUOS DE MINAS DE GUAJARAZ

Aspectos generales.

La construcción de estas presas está destinada al almacenamiento y decantación de los estériles proceden-

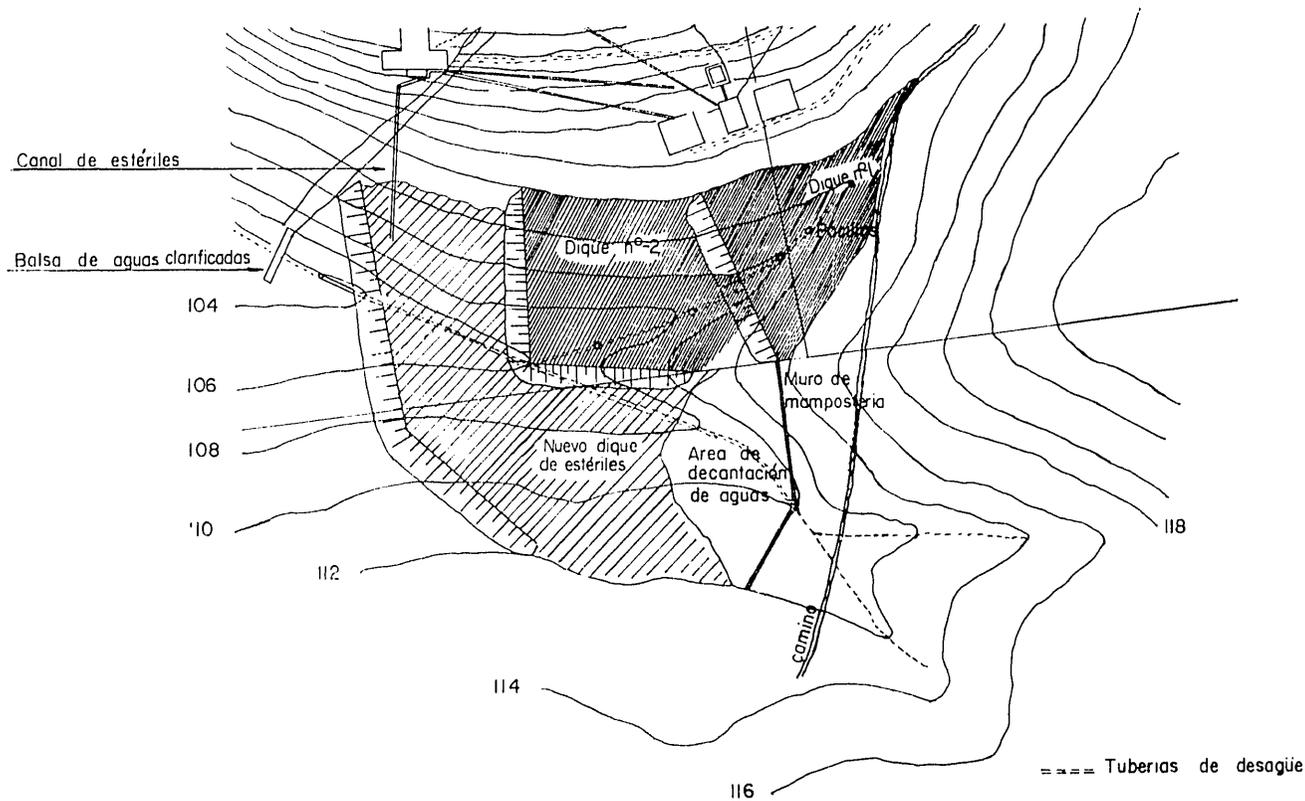


Fig. 1. — Esquema general del área de vertido. Diques de estériles.



Foto 1. — Vista parcial del dique. Parte central de la cerrada.

tes de las celdas de flotación de la planta de tratamiento de minerales de una pequeña explotación —mina "La Unión", de Minas del Guajaraz, S. A.— dedicada a la extracción de mineralizaciones de plomo y cinc, situada en Mazarambroz, a unos 20 Km al SO. de Toledo, en la carretera comarcal de esta ciudad a Cuerva.

El todo-uno procedente de las explotaciones pasa al taller de trituración, en donde se reduce a 20 mm, pasando posteriormente a unas tolvas de regulación de entrada a la planta de molienda y flotación. La molienda, con un clasificador en espiral, limita la misma a 65 mallas Tyler. Los estériles de la flotación, con una concentración del 30 por 100 en sólidos, se envían directamente a la presa de estériles para su decantación y almacenamiento.

El almacenamiento de estos estériles se ha venido realizando en diferentes presas, construidas todas ellas aprovechando pequeñas vaguadas naturales próximas a la planta de tratamiento (fig. 1). Su emplazamiento se ha establecido en función de la cerrada —muro de contención— y condiciones más ventajosas para los puntos de vertido y desagüe. Tanto los cauces vertebrales de esas vaguadas como sus laderas limitantes muestran pendientes muy suaves.

La presa actualmente en funcionamiento ha sido diseñada por el ingeniero de Minas D. M. M. Cavanna, especialista en procesos mineralúrgicos. Su construcción se inició en 1966 y en la actualidad ocupa una superficie aproximada de 30.000 m², tiene una altura de 15 m y una longitud del dique de 200 m (foto 1). Se tiene previsto llegar a una altura máxima de 25 m, con una capacidad de almacenamiento de 1,24 Mm³.

Sistema del vertido.

El vertido de los estériles se realiza por gravedad directamente desde la planta de tratamiento, por medio de canales en forma de V, de madera o semicirculares, de uralita, de tramos de 2 m de longitud, aprovechando el gradiente existente desde la planta al área de deposición o almacenamiento. Dado el escaso desnivel y proximidad existente entre la planta y el recinto de deposición no resulta necesario el empleo de tanques de disipación de energía.

La conducción de vertido recorre la presa, por su coronación, paralelamente al muro de contención, colocada sobre postes o caballetes de madera a una altura de 1,50 m sobre el nivel de los fangos (foto 2). La descarga se realiza directamente en el punto final de la conducción, variando el mismo, según las necesidades constructivas, añadiendo o quitando tramos a la misma. El vertido anual es del orden de 120.000 m³.

Sistema de drenaje.

El escaso volumen de precipitaciones —400 mm anuales— con un orden de 90-100 días de lluvia y máximas mensuales y diarias de 80 a 160 mm y de 25 a 40 mm, respectivamente— y de la superficie de la cuenca ver-

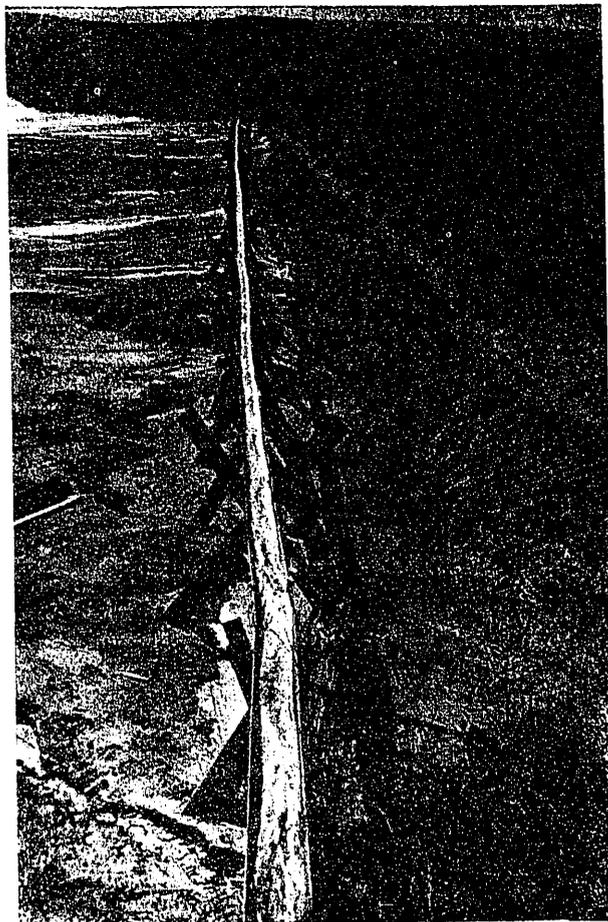
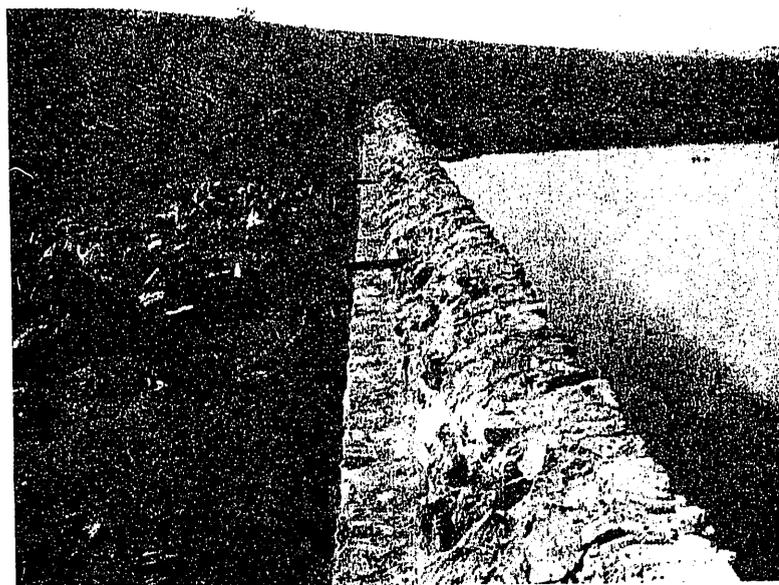


Foto 2. — Conducción de vertido.

Foto 3. — Muro de mampostería de retención de las aguas de la balsa.



tiente, proporcionan valores muy bajos para la crecida máxima, centenaria y milenaria —del orden de 0,2-0,4 m³/seg.—, que hacen que no se hayan tomado medidas especiales en el diseño del sistema de drenaje del dique.

Dicho sistema, en las presas abandonadas, estaba constituido por un colector de 250 mm de diámetro insertado en el lecho del arroyo y chimeneas o torres-aliviaderos de ladrillo, de 1 m de diámetro, para la recuperación de las aguas clarificadas. En la presa actual, dada la escasa recuperación de agua y dificultades de operación que representaba el sistema descrito, se ha pasado a la supresión de las chimeneas aliviadero, construyéndose un muro de mampostería para retener las aguas clarificadas de la balsa (foto 3), a través del cual —por medio de mechinales— se pasan a un colector de desagüe —de 600 mm de diámetro— insertado en el lecho del arroyo. En la figura 1 se ha esquematizado el sistema de drenaje.

La recuperación del agua clarificada es del orden de un 70-80 por 100, siendo almacenada en un pequeño dique dispuesto al pie de la presa, desde donde se recicla —mediante bombeo— a la planta de tratamiento, cuando ésta lo requiere. Dicha recuperación se consigue operando de un modo adecuado sobre los mechinales, los cuales van provistos de sus correspondientes tapones, con el fin de permitir únicamente el desagüe cuando se observa que el agua sale clarificada.

Aspectos constructivos.

La base de asentamiento del área o zona de deposición, está constituida por rocas metamórficas —paragneises— de excelente competencia mecánica, sobre las que descansa un pequeño recubrimiento arcilloso-limoso de colores rojizos, de elevada consistencia y prácticamente impermeables.

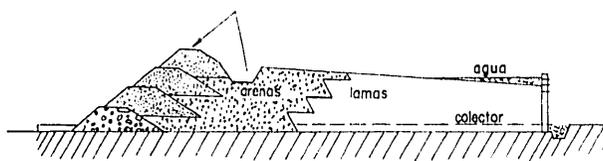


Fig. 2. — Representación esquemática de un corte longitudinal del nuevo dique de estériles.

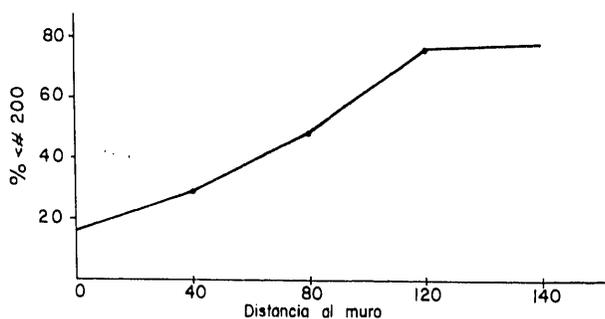


Figura 3.

La construcción se realiza por el método de aguas arriba, iniciándose con la construcción de un muro de mampostería, previo acondicionamiento de la base de asentamiento, de sección trapezoidal, de 2,5 y 1 m de anchura en su parte inferior y superior, respectivamente y de 1,5 m de altura máxima en la parte central de la cerrada, a partir del cual se inició la deposición o vertido de los residuos. La descarga se dispone de forma tal que se depositan los materiales más gruesos en la parte del muro y a la vez se desarrolla una especie de playa depositándose los finos a una distancia suficientemente segura del muro con un talud de 2°. Cuando el almacenamiento de los residuos en la balsa se aproxima a la altura del muro, se han ido construyendo muros o bermas adicionales, formadas por los materiales más gruesos, con un talud exterior de 30°. Estos muros adicionales —de 50 cm— se van construyendo con el material escarificado de la superficie de la capa deseada próxima al muro, procedimiento que se efectúa manualmente. La figura 2 esquematiza el sistema de construcción y la figura 3 muestra en un corte longitudinal el porcentaje de finos ($\% < \# 200$) en función de la distancia al dique. Las características fisicomíneralógicas de los materiales se expresan en el cuadro 1.

2. PRESAS DE RESIDUOS DE MINAS DE REOCIN

Aspectos generales.

Como consecuencia de las labores mineras llevadas a cabo por la Real Compañía Asturiana de Minas en sus explotaciones del criadero del Pb-Zn de Reocin, situadas a 5 Km de Torrelavega, en la provincia de Santander, ha sido necesario la construcción de varios diques de estériles para la decantación y el almacenamiento de los residuos procedentes del lavadero de flotación diferencial.

El todo-uno procedente de las explotaciones, previamente quebrantado en la mina a un tamaño menor a 150 mm, pasa a la planta de tratamiento de minerales, en donde es sometido a una trituración que lo reduce a 80 mm, tamaño máximo apropiado para el tratamiento del mineral por medios densos, para su proconcentración. El mineral preconcentrado pasa posteriormente a una trituración secundaria, quedando reducido a 10 mm antes de entrar al lavadero de flotación diferencial, en el que se efectúan diferentes fases de molienda a 48 y 90-100 mallas Tyler, pasando después a las celdas de flotación. Los estériles de la flotación con una concentración del 20 por 100 en sólidos se envían directamente, mediante bombeo, a las presas de estériles. La denominación y características de los diferentes diques construidos hasta el momento actual se exponen en el cuadro 2, en tanto que la figura 4 muestra la localización de los mismos en esta región minera.

En agosto de 1960 el dique La Luciana sufrió deslizamiento —de graves consecuencias— de una zona de ampliación efectuada posteriormente al dique principal, como consecuencia de las condiciones defectuosas de la base

CUADRO 1. — Características físico-mineralógicas de los residuos.

Parámetro	Peso específico grp/cm ³	Plasticidad	ANÁLISIS MINERALÓGICO										
			GRANULOMETRIA					FILICIFICADOS					
Material			% < 10	% < 40	% < 200	Cuarzo %	Dolomita %	Plagio-clasa %	Filicificatos de arcilla (Cacl. - Illita) %	Siderita %	Calcita %	Feldesp. potásico %	Yeso %
Muestra total...	—	No plástico.	100	97	52	—	—	—	—	—	—	—	—
Arenas dique	2,86	No plástico.	100	92	17	—	—	—	—	—	—	—	—
Lamas	2,89	No plástico.	100	100	79	21	9	6	27	30	3	3	Trazas

CUADRO 2. — Denominación y características de los diques construidos.

Caract.	Año en que fue iniciado	Año en que fue terminado	Volumen almacenado (m ³)	Superf. ocupada (Ha)	Tipo (topografía)	Tipo de construcción	Altura máxima del muro (m)	Longitud del dique (m)	Talud exterior del muro (grados)	Talud aguas arriba (Lamas) (grados)	Factor de seguridad pésimo	Situación actual	ObserVac.
Denom.													
Torres	1927	1951	3.200.000	7	Llano	Agua arriba	16	1.300	18	0-1	5	Abandonado	Restitución del paisaje
La Luciana.	1951	1960	1.250.000	9	Ladera	Agua arriba	25	750	18	0-1	1,75	Abandonado	Deslizam. parcial 1960
El Vallejo	1954	Indet.	75.000	—	Ladera	Agua arriba	—	200	18	—	—	Abandonado	C. exhaustivo
El Mazo ...	1960	1961	94.000	—	Ladera	Agua arriba	—	280	18	—	—	Abandonado	Restitución del paisaje y control
La Garma	1961	1973	1.276.000	5,5	Hoya natural + muro	Deposición natural y agua arriba	16	300	18	1	1,95	Abandonado	Restitución del paisaje y control
Gamedo	1973	1986 (prev.)	1.184.000	4,5	Hoya natural + muro	Deposición natural y agua arriba	16 (previsto)	300 (previsto)	18 (previsto)	1	1,91	En funcionamiento	Restitución del paisaje y control

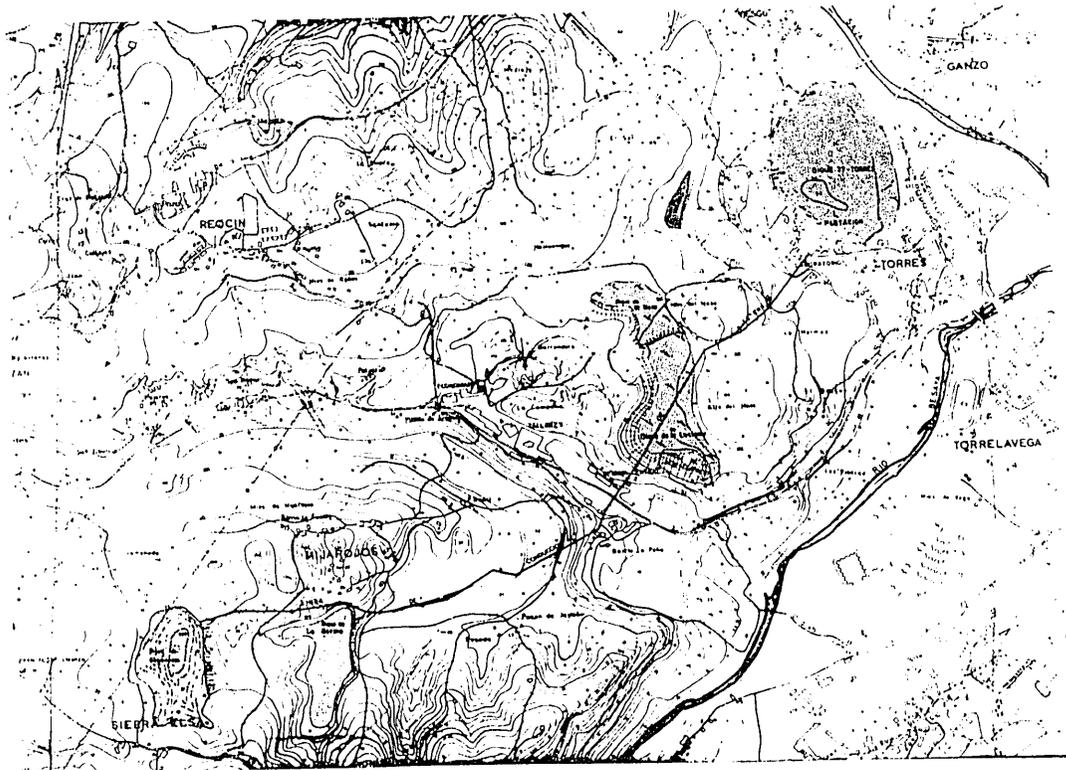
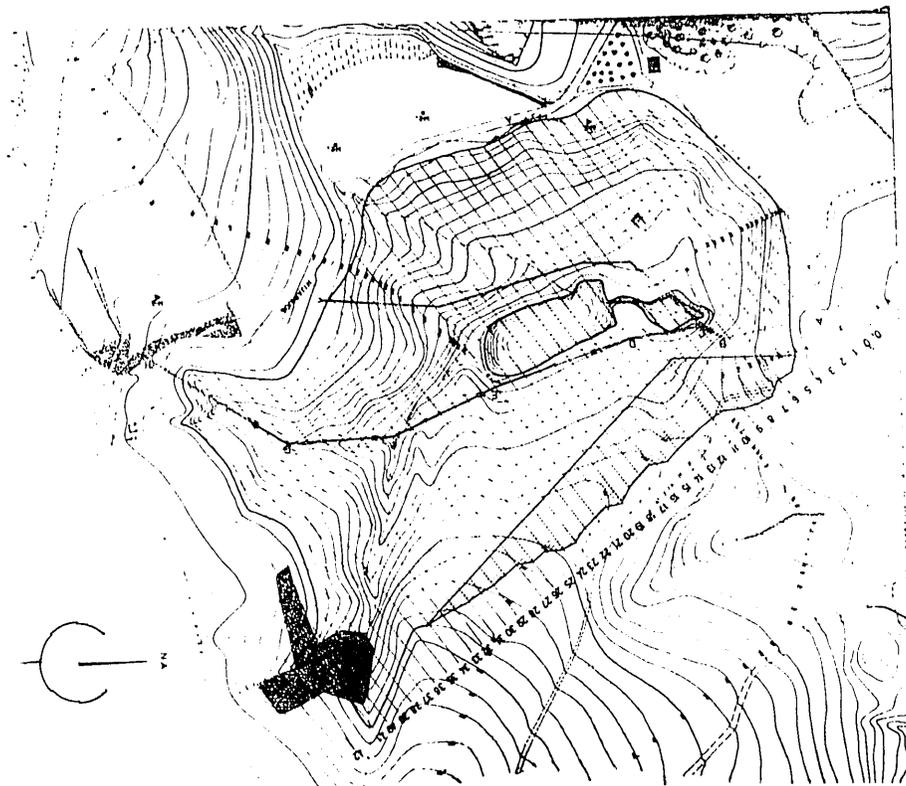


Fig. 4. — Plano de situación general de las presas de estiérces.

Fig. 5. — Representación esquemática en planta de la presa de estiérces de Gamonedo.



de asentamiento de las mismas. A raíz de este colapso, el diseño de todos los diques, así como las medidas de control que sistemáticamente se llevan a cabo por medio de un penetrómetro holandés de tipo Gouda, se realiza a partir de los resultados de un estudio exhaustivo de las características geotécnicas y condiciones de estabilidad de los diques construidos hasta esa fecha.

En la actualidad, por no disponer de superficies de terreno apropiadas y próximas al lavadero de flotación, es necesario transportar los estériles a una distancia de 2,5 Km y depositarlos, previa clasificación granulométrica apropiada, en cuencas naturales y cerradas en la casi totalidad de su periferia —diques de La Grama y Gamonedo—. La figura 5 muestra la zona de vertido de la presa de Gamonedo, actualmente en construcción.

Sistema de vertido.

En todos los casos el sistema de vertido se ha realizado mediante bombeo de los estériles, desde el lavadero a la zona de almacenamiento. Dicho sistema consta actualmente de 11 estaciones de bombeo instaladas con dos bombas Wilfley —una de las cuales es de repuesto—.

La longitud de la conducción es, en la actualidad, de 2.500 m y va apoyada sobre castilletes metálicos con una pendiente del 3 por 100 en todos sus tramos para evitar decantaciones. En la figura 4 se muestra el trazado actual de la misma.

El vertido de la presa se hace mediante canales de madera de 20 x 20 cm, que recorren la coronación del dique paralelamente al muro, con agujeros de 40 mm de diámetro, separados 2 m entre sí y soportados por postes de madera (foto 4).

Por otra parte, para impedir que el viento impulse la pulpa en otras direcciones que se aparta de la vertical, con el consiguiente riesgo de erosiones e incluso de la propia estabilidad de las paredes del dique, se colocan unos tubos en forma de embudos, de tal modo que el embudo quede recogiendo la pulpa que sale por los agujeros practicados en el canal, que es conducida hasta los tableros colocados para la formación de la nueva pared (foto 5). El vertido anual es del orden de 11.000 Tm por mes, representando un caudal de pulpa de 4.000 litros por minuto.

Sistema de drenaje.

En todos los casos el sistema empleado para el drenaje de las aguas clarificadas ha sido por medio de colectores apoyados en el terreno y atravesando el muro por la parte inferior. La entrada del agua a los colectores se regula por medio de chimeneas-aliviaderos tangentes, construidos de ladrillo. La altura máxima de estas chimeneas no sobrepasan los 12 m, a excepción del dique de Torres, en el que se levantaron hasta de 20 m. El número de chimeneas o compuertas es función de la superficie del dique y de las características hidrológicas de la zona de emplazamiento. La experiencia en esta región minera da como buena una compuerta por hectárea de dique,

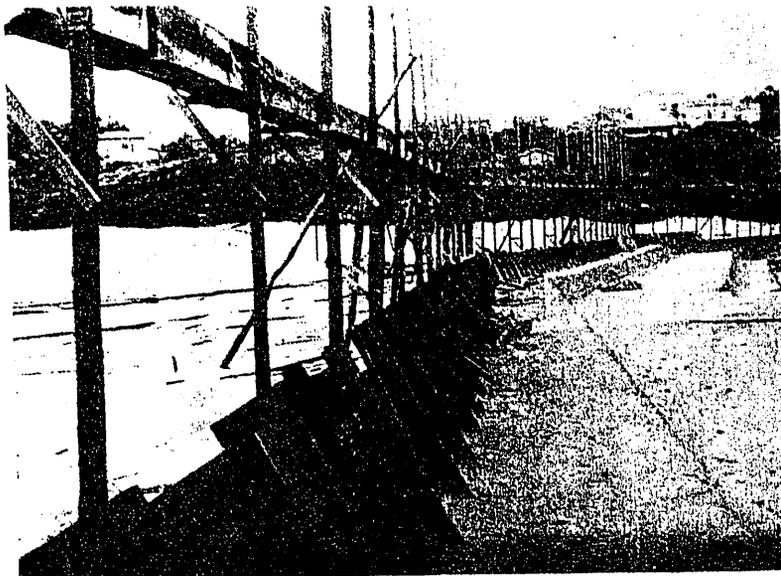


Foto 4. — Conducción de vertido de la coronación.

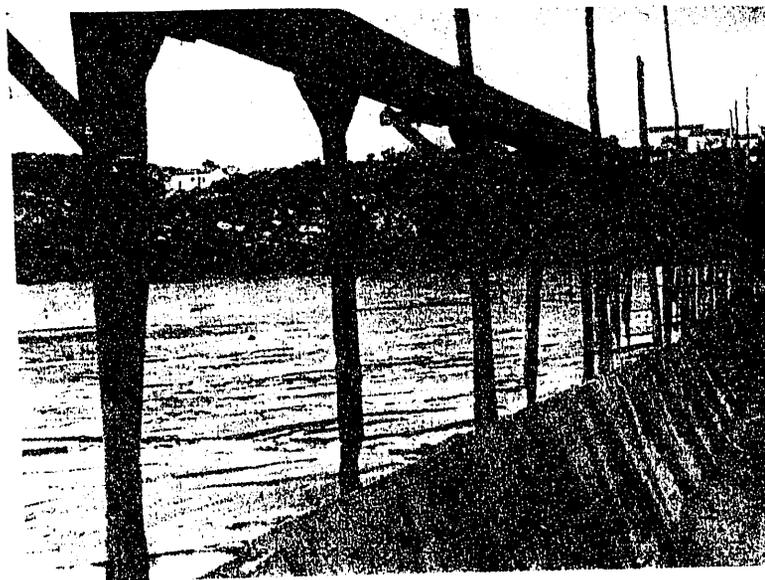


Foto 5. — Canales de vertido con embudos de conducción de la pulpa a la formación de la nueva pared.

donde el dato máximo de pluviosidad es de 83,5 l/m² en veinticuatro horas.

Estas compuertas se levantan sobre un lecho de hormigón de espesor variable según la resistencia del terreno, y las paredes se hacen de doble asta, excepto una de ellas, que se va levantando con tablas hasta una altura máxima de 2 m, procediéndose entonces a cerrar por la parte interior de la madera, que no se quita. El hueco de la compuerta o chimenea es de forma rectangular, aproximadamente, de 70 x 70 cm (foto 6). El drenaje del agua clarificada se efectúa regulando el nivel de la pared

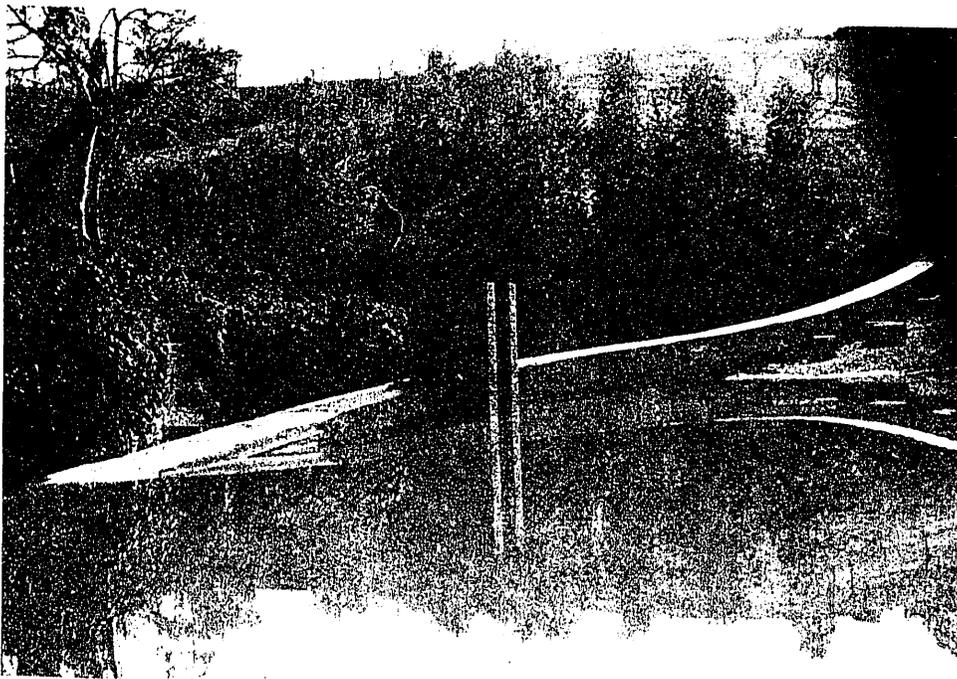


Foto 6.— Vista parcial de un colector con chimenea-aliviadero. Presa de Gamonedo.

de madera de forma tal, que las lamas decantadas queden por debajo del nivel superior de esa pared. Una vez que las lamas alcanzan la altura dada a la chimenea, se taponan con hormigón la comunicación al colector, pasando posteriormente a funcionar la siguiente chimenea.

En el caso de la presa de Gamonedo, actualmente en construcción, el drenaje, de un modo análogo que en el de La Garma, se realiza a través de un colector de hormigón armado y sección circular, que vierte las aguas clarificadas a través de una cavidad subterránea que se comunica con la presa de almacenamiento de agua, desde donde se reciclan a la planta de tratamiento. En el extremo de este colector se hace un ensanchamiento del que parten otros dos colectores que bordean la hoya uno por cada lado (fig. 5). Del mencionado ensanchamiento parte, en vertical, una chimenea registro de hormigón armado de sección circular. El interior de esta chimenea registro va provisto de escala metálica al fin de poder bajar y observar el desagüe. Los colectores tienen una pendiente mínima del 3 por 100, garantizando un caudal a plena carga de 450 litros por segundo cada uno.

Por otra parte, el sistema de drenaje del agua infiltrada en la presa varía de unos diques a otros, siendo el de La Luciana el que ha presentado mayores dificultades de ejecución, por las deficientes características del establecido inicialmente. En la actualidad se realiza por medio de pozos dispuestos al pie del depósito y dentro de las zonas más conflictivas. El desagüe de estos pozos se efectúa por medio de sondeos horizontales entubados (foto 7) puestos en comunicación con los pozos. Asimismo, como medida de control, se han instalado piezómetros, siendo práctica corriente su instalación en todos los diques construidos.

Por el contrario, en los diseñados últimamente —La Garma y Gamonedo— dicho drenaje se efectúa a través de un filtro graduado instalado en la base del muro, una vez saneada ésta hasta descubrir el basamento rocoso, en la que se extienden cinco capas filtrantes de diferentes espesores y granulometrías.

Aspectos constructivos.

La zona de asentamiento de estos diques varía según su ubicación; así, el de Torres está asentado sobre una terraza fluvial formada por arenas y cantos rodados, de 3 a 4 m de espesor, sobre el basamento rocoso de calizas. La Luciana, a excepción de la zona desprendida que

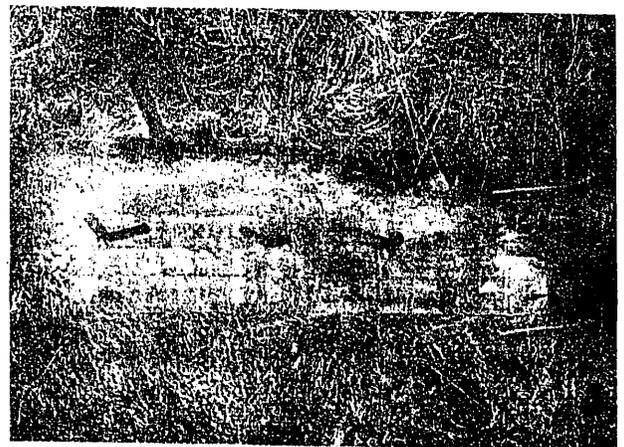


Foto 7.— Emboquillado de los sondeos horizontales de drenaje.

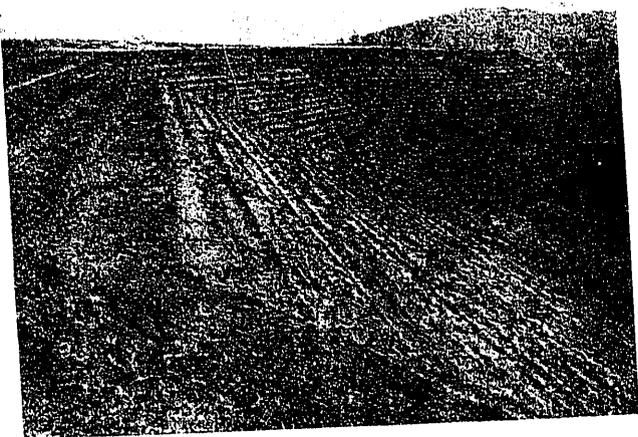


Foto 8. — Vista parcial del dique "La Luciana."

se encontraba sobre una escombrera antigua, su base de asentamiento presenta una excelente competencia mecánica. Por su parte, La Garma y Gamonedo se encuentran en una zona típica de karst alóctono ocasionado por un arroyo de curso paralelo al buzamiento de la estratificación. El basamento rocoso está formado por calizas y areniscas con arcillas y margas rojas compactas. El recubrimiento lo constituyen coluviones y eluviones, sin signos de aluviamiento, de escasa potencia —0,5-1 m—, salvo en puntos localizados que llegan a tener de 3-4 m.

Todos los diques se han construido por el método de aguas arriba, con un talud exterior del muro de 18° y formado por escalones —paredes— de $2,40 \times 0,80$ m e inclinación de 70° , dejando —separaciones— descansos cada 15 paredes de, aproximadamente, 4 m (foto 8).

En la construcción de las paredes se utilizan tableros incrustados en la pared inferior. El tablero se mantiene

apoyado por medio de unas riostras que se recuperan cuando la arena que forma el nuevo dique es capaz de soportar el mismo. Una vez terminada una pared, se deja un plazo mínimo de quince días antes de la construcción de otra encima, con el fin de lograr una mejor eliminación de la humedad de las paredes del dique.

Los cuadros 3 y 4 exponen las características geotécnicas y químicas de los residuos, en tanto que la figura 6 muestra la resistencia a la penetración de los materiales que constituyen el dique de La Luciana en una de las zonas más conflictivas de la misma. Por otra parte, los componentes mineralógicos, tanto de la muestra total de las arenas del dique como de las lamas, responden, por orden de importancia, a: dolomita, calcita, cuarzo, marcasita, pirita y trazas de yeso.

3. PRESAS DE RESIDUOS DE MINAS DE CERRO COLORADO

Aspectos generales.

La construcción de estas presas —Gossan y Cobre— responden al almacenamiento de los estériles procedentes de las instalaciones de preparación y concentración del mineral, de la explotación a cielo abierto del yacimiento de minerales complejos de cobre de Cerro Colorado, de Río Tinto Patiño, S. A., situada al lado del mundialmente conocido yacimiento de piritas de Río Tinto, en la provincia de Huelva.

El proceso de preparación y concentración del mineral se divide en dos ramas con algunos puntos comunes, una para el mineral de cobre con una capacidad de tratamiento de 3.000.000 Tm de todo-uno al año, y la segunda para el Gossan, planta de oro y plata, con una capacidad de tratamiento de 1.500.000 Tm/año. El todo-uno procede de la co:ta, previamente sometido a una tri-

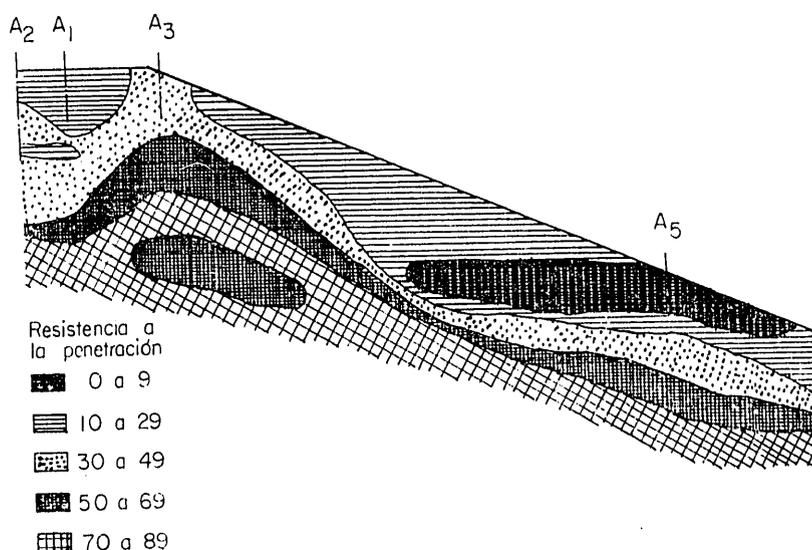


Fig. 6. — Perfil transversal del dique mostrando la resistencia o la penetración de los materiales.

CUADRO 3. — Características geotécnicas de los residuos

Parámetro	Peso específico (gr/cm ³)	Plasticidad	Densidad máxima y mínima (gr/cm ³)	Materia orgánica oxidable (al MnO ₂)	Granulometría			Compactación (ensayo Harvard)		Coeficiente de consolidación (Cc)	Coef. permeab. normal, Kn (cm/seg.)	Resistencia a la compresión simple (kg/cm ²)	Angulo rozam. interno efectivo (φ)	Cohesión efectiva, C' (kg/cm ²)	Tixotropía
					% < 10	% < 40	% < 200	Densidad óptima (gr/cm ³)	Humedad óptima (%)						
Muestra total	2,99	No plástico.	—	13	100	99	85	—	—	—	—	—	—	—	2,6
Arenas del dique	2,97	No plástico.	1,91 1,24	11	100	98	60	—	—	—	—	—	36°	0	—
Lamas	2,99	No plástico.	—	14	100	100	100	—	—	0,15-0,20	10 ⁻⁷	0,30-1,06 (2-10% def.)	—	—	3

CUADRO 4. — Análisis químico de los residuos.

Componente	SiO ₂ libre %	SiO ₂ combinado %	S %	FeO %	Fe ₂ O ₃ total %	As %	Al ₂ O ₃ %	MgO %	CaO %	K ₂ O %	Cu p.p.m.	Pb p.p.m.	Zn p.p.m.	Na ₂ O %	P.F. %	CO ₂ %
Muestra total	1,66	0,80	4,22	5,82	10,22	0,015	0,25	13,80	34,20	0,11	120	1,591	4,330	0,04	35,81	31,70
Lamas	1,53	0,80	3,05	6,33	13,43	0,03	0,40	14,73	32,30	0,14	212	3,766	4,388	0,04	36,8	33

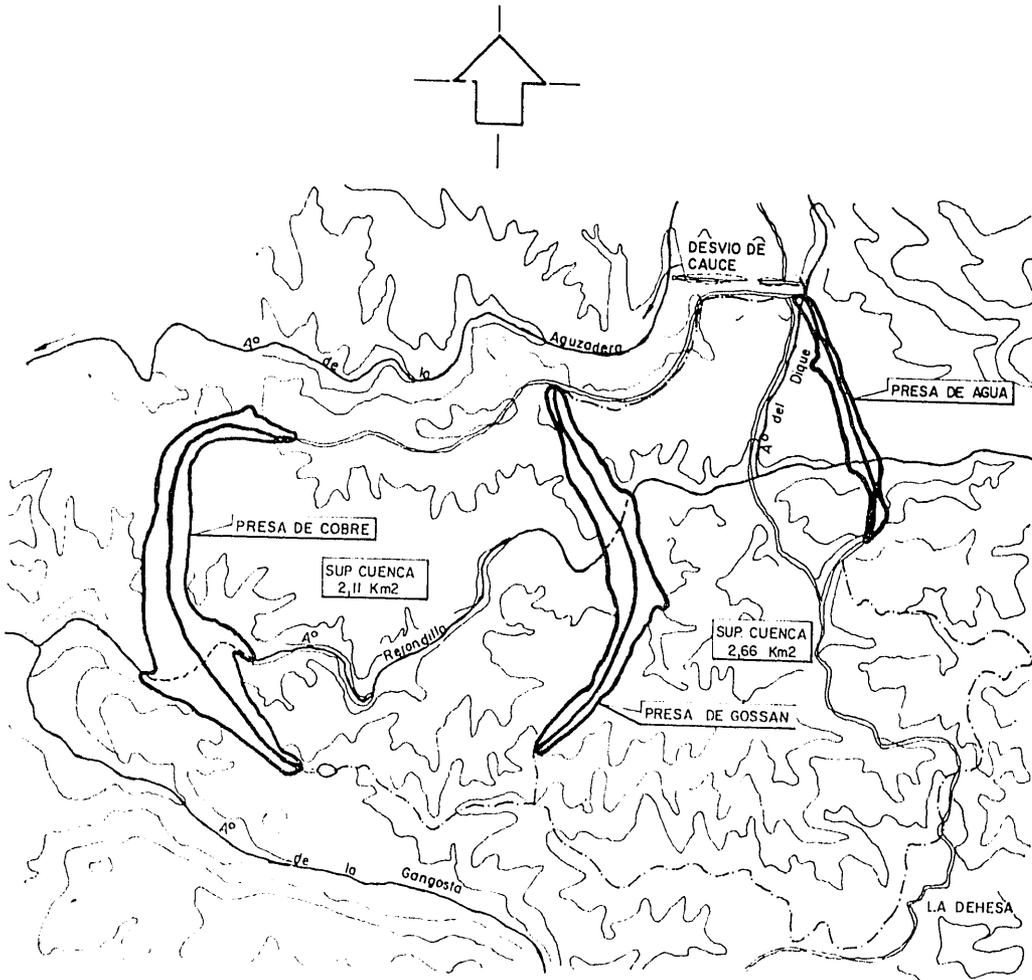
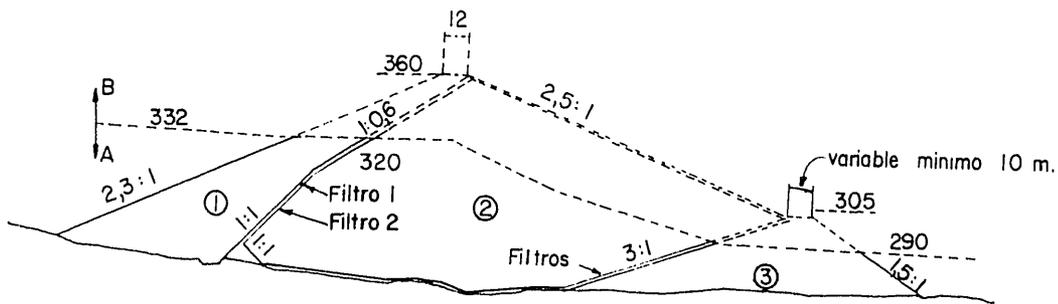


Fig. 7 — Esquema general de la zona de vertido.



- ① Arena limo arcillosa $IP \geq 8$ Tamaño máximo 20 cm.
 - ② Gravas y arenas limo arcillosas
 - ③ Escorias
- A Construido conforme solución inicial

Fig. 8. — Presa de Cobre. Sección tipo inicial

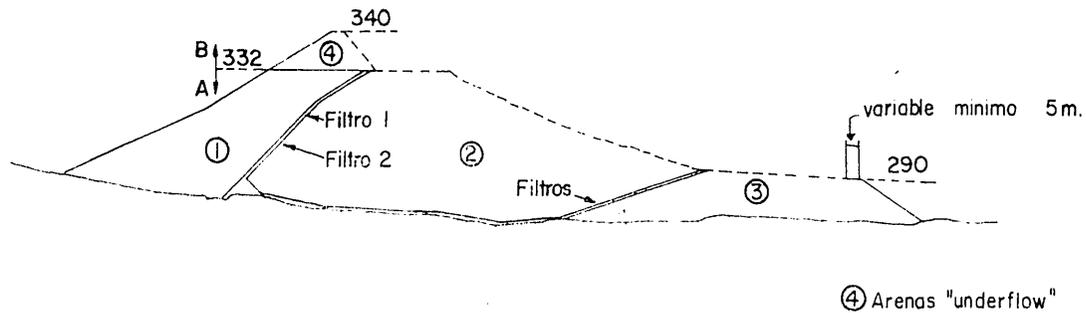


Fig. 9. — Presa de Cobre. Sección tipo actual.

turación primaria y otra secundaria, pasa al circuito de molienda donde se reduce a 200 mallas Tyler antes de enviarlo a la flotación de desbaste, de donde se obtiene, por un lado, un residuo de desbaste, y por otro, una pulpa que se somete a una remolienda a 325 mallas Tyler antes de pasar al circuito de relavado. Las ocias de la planta fluyen a un espesador de estériles de 92 m de diámetro y, desde el mismo, por gravedad, se envían a las presas de residuos destinadas a tal efecto.

Ambas presas —Gossan y Cobre— están situadas en el arroyo del Rejondillo, con unos volúmenes iniciales previstos de almacenamiento de 22,3 y 36,3 Hm³, respectivamente. En la figura 7 puede verse la ubicación de estas presas, así como el área general de vertido.

Aunque ambas presas tienen suficiente entidad para ser tratadas como ejemplos significativos de diques de estériles, hemos considerado más conveniente centrarnos únicamente sobre la presa de Cobre, ya que ésta integra, de un modo más completo, el conjunto de operaciones que se ha seguido en el diseño y construcción de las mismas.

En el proyecto inicial se preveía la construcción de una presa de 90 m de altura con un volumen de almacenamiento de 60 Mm³, aprovechando para su construcción los materiales estériles procedentes de la corta. A mediados de 1972 la dirección técnica de la mina pensó en cambiar el sistema de construcción, debido, por un lado, a la escasez de materiales adecuados para continuarla por el sistema original y, por otro, al inferior costo por el nuevo sistema, consistente en recrear la presa mediante el empleo de fracciones más gruesas de los residuos, separadas convenientemente. En las figuras 8 y 9 se muestra una sección tipo del proyecto original y del estado actual del dique.

El diseño de la presa original fue realizado por la Empresa de Estudios y Proyectos Técnicos Industriales (EPTISA), iniciándose su construcción en 1968 y teniendo en la actualidad una altura de 70 m, una longitud del dique en su coronación de aproximadamente 2 Km y ocupando una superficie de 2,11 Km². En la actualidad se tiene en proyecto la elevación de la misma a 120 m para un almacenamiento de 120 Mm³.

Sistema de vertido.

Los residuos procedentes del espesador, con un 45 por 100 de sólidos en peso, se conducen por una tubería de fibrocemento hasta una estación de deslamado —ciclonado previo— que es optativo, consistente en cuatro ciclones y una arqueta de tamizado de gruesos, desde donde continúa por otra tubería de igual material a la coronación de la presa. Allí, mediante válvulas y por tuberías de plástico flexible, pasan a la batería de ciclones, vertiéndose las arenas sobre la presa y las lamas al embalse (foto 9). La operación del ciclonado da un punto de corte del orden de las 100 micras.

La conducción hasta la presa está provista de tanques rompedores o de disipación de energía, a intervalos de distancia de unos 200 m. Dichos tanques se van cerrando al ir necesitándose más presión conforme se incrementa la cota de la presa. Por otra parte, a lo largo de toda la conducción existen numerosas salidas de rebose y válvulas para desviar totalmente o parte de la carga directamente al embalse, cuando así convenga a la operación o en caso de averías.

Los residuos pueden ciclarse directamente en coronación o deslamarse en la estación de ciclonado previo.



Foto 9. — Vista general del vertido de las lamas.



Foto 10. — Tanque de disipación de energía.

Este deslamado se efectúa cuando interesa verter la mayor parte de las lamas por la cola del embalse, con el fin de aprovechar al máximo éste y mantener el agua en la zona de las bombas de recuperación. Tiene el inconveniente de que se pierden parte de las arenas, pero aumenta la eficacia del ciclonado en coronación. El producto deslamado sale con un 54 por 100 de sólidos en peso y es necesario añadirle agua, diluyéndolos nuevamente hasta el 45 por 100, para asegurar su transporte por la tubería y mejorar el segundo ciclonado.

En la batería de coronación los ciclones van colocados sobre castilletes metálicos móviles, especialmente diseñados para evitar que las arenas entierren las mangueras de alimentación y descarga (foto 11).

Sistema de drenaje.

Aguas arriba de los diques de estériles se ha construido una presa de agua que tiene por objeto desviar las aguas del arroyo a un cauce lateral, así como recoger las aguas de escorrentía procedentes de las laderas (fig. 7). Este sistema hace a la cuenca vertiente deficitaria, proporcionando una defensa idónea a la zona de

presas, por lo que las aguas aportadas a esos recintos pueden considerarse insignificantes. Por otro lado, el drenaje de las aguas clarificadas de las balsas se efectúa directamente, desde el área de decantación, mediante bombeo, reciclándose posteriormente a la planta de tratamiento.

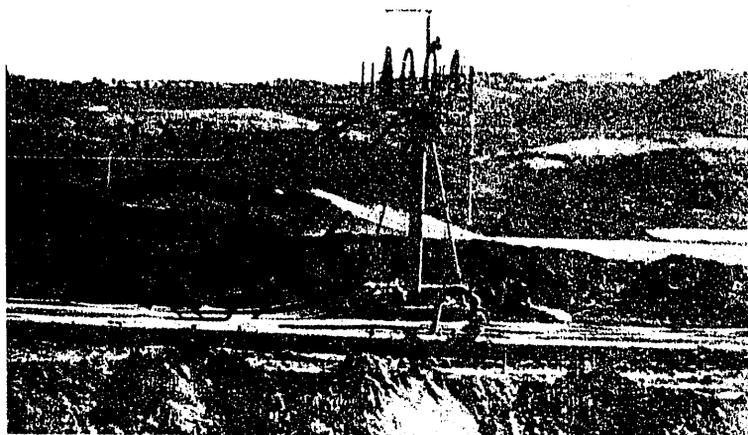
En cuanto al sistema de drenaje de la propia presa está constituido por un dren de fondo de todas las vauadas que vierten aguas abajo en el terreno natural, desde las cuales se eleva la pantalla de filtros a todo lo largo de la presa que recoge las aguas procedentes de la red de filtración natural del depósito (fig. 9), conduciéndolas al pie de la misma. La capacidad de drenaje de este sistema es muy superior a los posibles volúmenes de agua que pueden producirse, habiéndose comprobado su efectividad y velocidad de conducción mediante fluoresceína.

El drenaje del agua de deposición de las arenas en coronación se efectúa por medio de una preparación —del dique inicial a partir de la cota 32— consistente en dar pendiente al terreno compactado y sellado hacia la pantalla de filtro y zona central, longitudinalmente a todos los puntos de la presa que no tengan salida natural hacia aguas abajo.

Sobre este terreno preparado se ha extendido una alfombra graduada de grava de 18/75 mm, garbancillo de 5/18 mm y arena de río en la relación 60/30/10 cm de espesor, sobre la que se vierten las arenas saturadas del ciclonado para que pierdan humedad y poder compactarlas con una humedad inicial adecuada. Todos los materiales han cumplido las condiciones siguientes:

$$\frac{D_{1.5}(G)}{D_{4.75}(F)} < 5.4, \quad \frac{D_{1.5}(G)}{D_{1.5}(F)} < 20 \text{ y } \frac{D_{75}(G)}{D_{75}(F)} < 25,$$

Foto 11. — Castillete metálico móvil de instalación de los ciclones.



así como la de limpieza:

$$D_{200} \ddagger < 5 \%$$

y uniformidad:

$$\frac{D_{60}}{D_{1.5}} < 20,$$

no siendo alterables ni física ni químicamente.

Para el drenaje de los recrecimientos posteriores se hace necesario un nuevo sistema que podrá conectar con el dren principal, o bien drenar hacia el talud de aguas abajo, dependiendo del sistema de colocación que se utilice. Todo este agua drenada se recoge en una pequeña presa situada aguas abajo del dique, dispuesta para tal efecto.

Aspectos constructivos.

La base de asentamiento de este depósito está constituido fundamentalmente por rocas de textura pizarrosa, donde predominan las filitas, que presentan muy buena competencia mecánica, rumbo N 70° W y buzamiento subvertical.

Dadas las buenas características mecánicas del área de asentamiento del depósito, no fueron necesarias labores especiales de acondicionamiento, a excepción de la ladera derecha —aguas arriba— que fue necesario sanear adecuadamente para rebajar su talud, que presentaba signos de inestabilidad, y así evitar posibles asientos diferenciales que dieran lugar a la formación de grietas en el dique y pusiesen en peligro su seguridad.

El material empleado en la construcción de la presa de acuerdo al diseño inicial procedía de los estériles de la corta, tanto para el núcleo como en el espaldón resistente. Este material es un suelo mezclado con roca de diversos tamaños; podríamos definirlo como una arena o grava limo-arcillosa. Por un lado, en el núcleo, se

han empleado materiales con I.P. > 8 con un tamaño máximo de piedra de 20 cm, en tanto que, aguas abajo, se ha colocado todo tipo de material que la mina consideró como estéril. Ambas zonas se han extendido y compactado en capas de 40 cm, antes de compactar, obteniéndose como densidades secas medias 1,97 Tm/m³ en el núcleo y 1,99 Tm/m³ en el espaldón. En el tacón de aguas abajo se han empleado escorias de elevado peso específico de partícula (3,45), lo que ha llevado a densidades secas de compactación del orden de 2,30 Tm/m³.

El sistema actual de construcción es el de aguas abajo, llevando el avance, desde el borde de aguas arriba hacia aguas abajo, por sucesivos recrecimientos de tal altura que permitan llevar siempre una ventaja notable a las lamas y aguas del embalse. El dique inicial lo constituye toda la presa construida hasta la cota 332 (figura 10), dejándose el talud de aguas arriba con un valor de 1,7 : 1, que es el natural de deposición de las arenas, lo que proporciona un gran ahorro operativo y la posibilidad de tender el talud de aguas abajo hasta 3,3 : 1, al aprovecharse también el talud más levantado de la escollera de aguas abajo.

El recrecimiento se efectúa una vez realizado los primeros cuatro metros a lo largo de la presa y en el borde de aguas arriba, después al tresbolillo, colocada la conducción sobre el talud del primer montón, va otra fila que hace el segundo recrecimiento a la distancia conveniente para dar el talud buscado de 1,7 : 1.

Actualmente se controla diariamente el nivel del agua en la presa; el caudal de filtración mediante un vertedero de lámina rectangular construido al pie de la misma en la vaguada principal, que ha mostrado volúmenes de filtración de 20 l/seg., y se lleva una observación periódica del estado general del sistema de drenaje. Las tomas de caudal realizadas, durante cuatro meses, han dado la cifra media de recuperación de la batería del ciclónado de 18,7 por 100 de los sólidos de la alimentación, en el "underflow", diluidas al 28 por 100 de agua en peso, parte de la cual se filtra hasta quedar las arenas en la coronación con un 11 por 100, cifra muy próxima a su

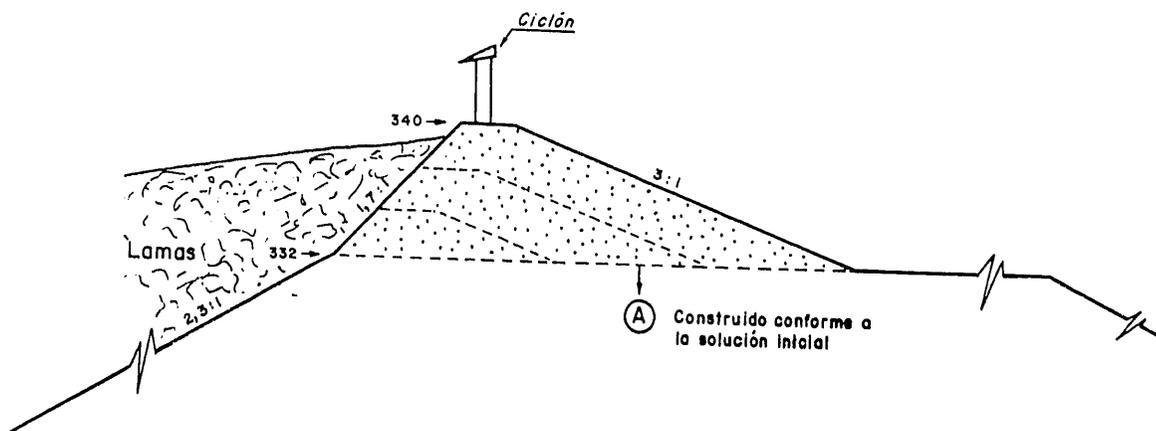


Fig. 10. — Esquema general del sistema de construcción empleado actualmente.

CUADRO 5. — Características geotécnicas de los residuos

Parámetro	Densidad in situ gr/cm ³	Peso específico grp/cm ³	Densidad máxima y mínima gr/cm ³	Plasticidad	GRANULOMETRIA			COMPACTACION		Permeabilidad normal, Km cm/seg	Angulo de rozamiento interno efectivo ϕ'	Cohesión efectiva Cl.
					% < 10	% < 40	% < 200	Densidad óptima Tm/m ³	Humedad óptima %			
Arenas "underflow" del ciclonado	1,66	2,94	No deter. 1,30	No plástico.	100	98	30	1,83	11,5	$4 \cdot 10^{-4}$	27-32°	0
Arenas "overflow" del ciclonado (lamas)	—	2,80	1,93 1,07	No plástico.	100	100	85	—	—	$3,4 \cdot 10^{-4}$ $9,1 \cdot 10^{-4}$	25°	0

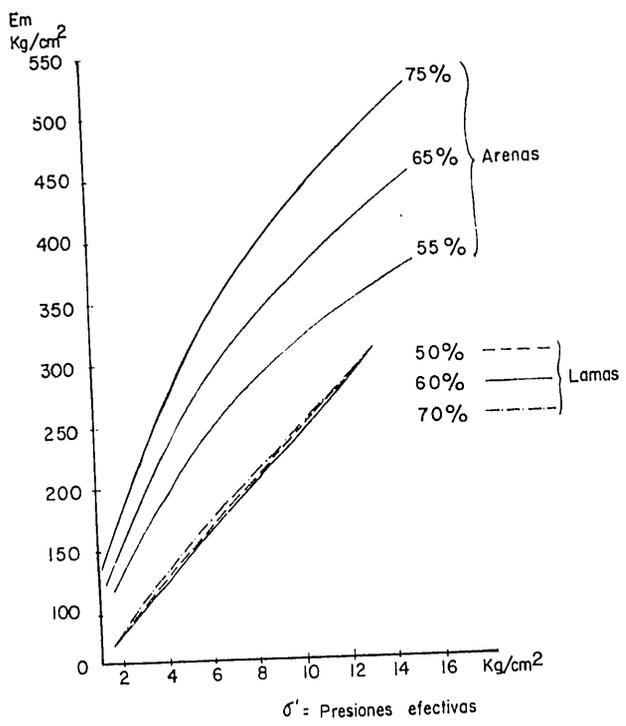


Fig. 11. — Variación del módulo edométrico secante para diferentes densidades relativas.

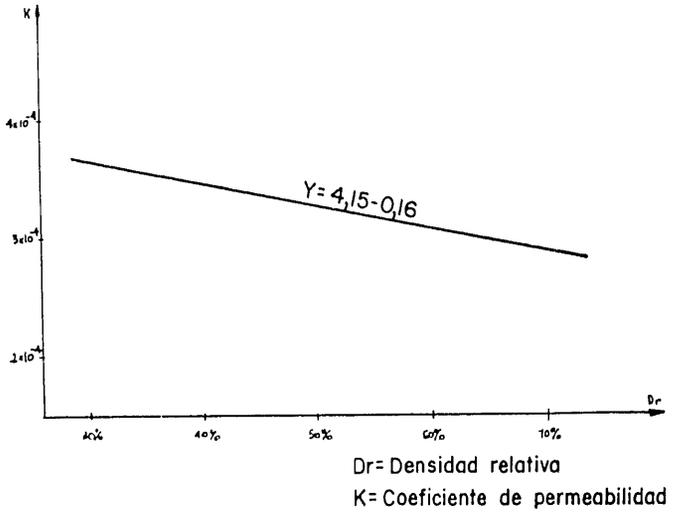


Fig. 12. — Variación del coeficiente de permeabilidad normal en función de la densidad relativa.

humedad óptima de compactación. Las lamas se envían al embalse con un 59 por 100 de agua en peso, de la que retiene hasta un 35 por 100.

Topográficamente se ha comprobado que las lamas forman en el embalse una pendiente de 1 por 100 al aire libre, cambiando a un 10 por 100 cuando están sumergidas, por lo que se ha tomado, para las cubicaciones, el contacto de estas dos pendientes, como la línea me-

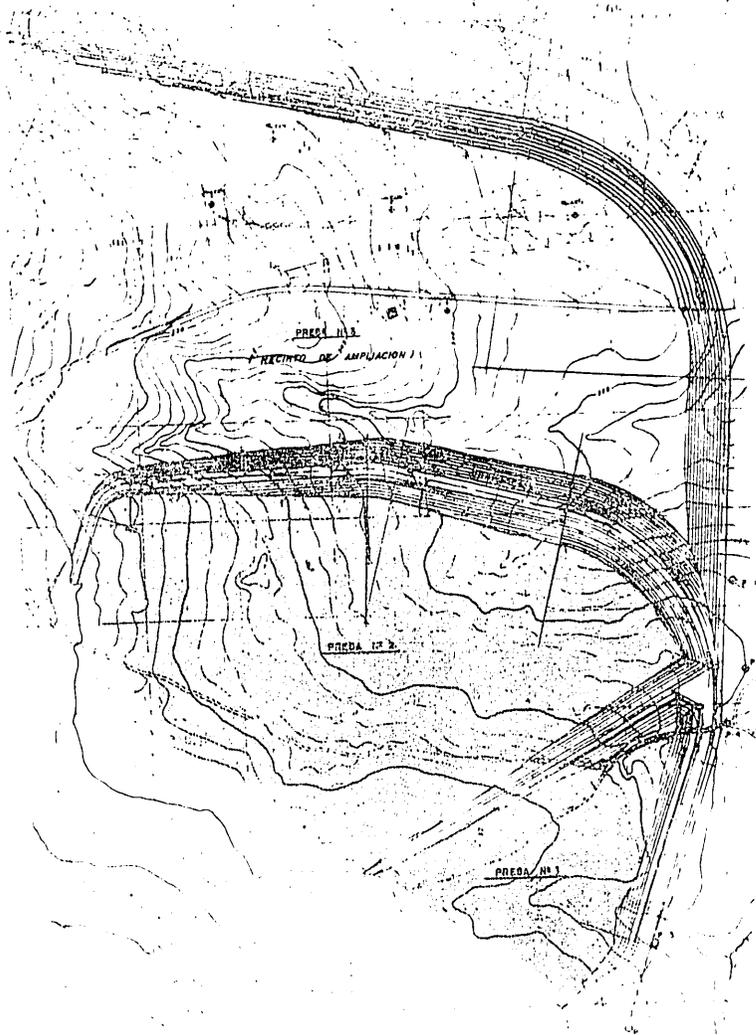


Fig. 13. — Planta general de la zona de presas.

(Nota: En el dique de contención de la periferia no se ha representado el paramento de aguas abajo.)

dia alrededor de la cual el borde del agua oscila entre invierno y verano.

Por otra parte, se ha efectuado un estudio exhaustivo de las características geotécnicas de los residuos, se exponen en el cuadro 5, estudio que ha servido para un control cuidadoso en el funcionamiento del depósito. Las figuras 11 y 12 muestran la variación de algunas de dichas características en función de la densidad relativa.

4. PRESAS DE RESIDUOS DE MINAS DE ARINTEIRO

Aspectos generales.

La explotación a cielo abierto —por Río Tinto Patiño, S. A.— de los yacimientos de Arinteiro y Fornás, situados a unos 25 Km de Santiago de Compostela, en la

provincia de La Coruña, ha hecho necesario la construcción de varias presas de residuos —recintos 1, 2 y 3— para el almacenamiento y decantación de los lodos procedentes de la planta de tratamiento de minerales. Las mineralizaciones comprenden, principalmente, pirrotina y calcopirita, estando localizadas en un horizonte de antibolitas graníticas encajado en esquistos y antibolitas de grano fino.

El proceso de preparación y concentración del mineral tiene una capacidad de tratamiento de 1.500.000 Tm anuales. El todo-uno procedente de las explotaciones pasa a la planta de trituración que, en varias fases, lo reduce a un tamaño inferior a 13 mm antes de pasar al circuito de molienda. En éste el material se reduce a un tamaño inferior a 200 mallas Tyler, enviándose posteriormente a las celdas de flotación. Las colas de la planta de flotación pasan a un espesador de estériles y, desde aquí, a las presas de residuos.

Actualmente, tanto la presa 1 como la 2 están constituidas únicamente por un dique inicial de 17 m de altura, en tanto que la 3 está en fase de preparación. El recinto 1 fue proyectado para cumplir una primera etapa como depósito de almacenamiento de agua —con una capacidad de 300.000 m³— hasta la puesta en marcha de la planta, para pasar posteriormente a almacenar residuos. La capacidad final de estos depósitos es de 15 Mm³, ocupando una superficie de 100 Ha, con una longitud de coronación de 1.900 m en su periferia y una altura final de 40 m; altura que será alcanzada por recrecimiento del dique inicial con los propios residuos. La construcción de estos depósitos ha estado obligada por las características operativas de la mina, pasando a ser un recinto único a partir de la cota de coronación del dique inicial. Por otra parte, su emplazamiento (fig. 13) se ha establecido en función de las condiciones más ventajosas para los puntos de vertido y desagüe, mostrando toda la zona una topografía muy suave, del orden del 5 por 100 de pendiente media.

El proyecto fue realizado en 1971 por la Empresa Internacional de Ingeniería y Estudios Técnicos, S. A. (INTECSA), entrando en funcionamiento en 1975 los depósitos 1 y 2. Asimismo están actualmente en fase de proyecto depósitos de características similares, como son el de Rubiales, Candín y Aznalcollar.

Sistema de vertido.

Los estériles de flotación se bombean desde el espesador a un depósito de distribución, a partir del cual se envían —por gravedad y con una concentración de sólidos del 50 por 100 en peso— a la zona de presas a través de una conducción de unos 600 m de longitud. La conducción de vertido recorre la presa, por su coronación, paralelamente al muro de contención, efectuándose el vertido en el área de deposición a través de mangueras flexibles, "spigots" (fig. 14, foto 12).

Por otra parte, la conducción hasta la zona de presas va apoyada sobre dados de hormigón, o de madera, según los tramos, y con una pendiente mínima admisible

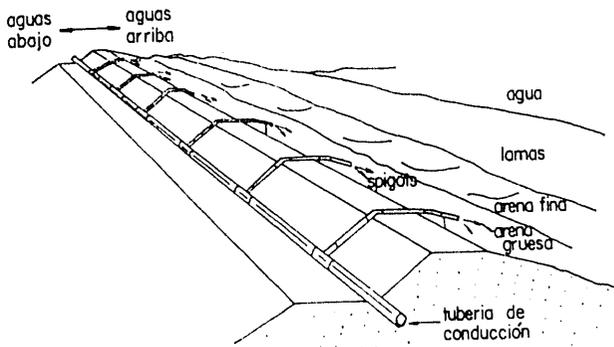


Fig. 14. — Representación esquemática del sistema de vertido.

del 3 por 100. Asimismo va dotada de una válvula de compuerta que permite estrangular la sección y, de este modo poder regular el caudal. El vertido anual es del orden de 3.000.000 de toneladas.

Sistema de drenaje.

La precipitación media anual en la zona de deposición es de 1.400 m.m., con una cuenca vertiente de 30 hectáreas, lo que ha obligado a efectuar unas labores de drenaje consistente en la excavación de una zanja bordeando la zona de presas, al fin de evitar la aportación de agua de escorrentía a las mismas. Por otro lado, para recoger las posibles filtraciones a través del dique inicial, se ha excavado otra zanja al pie del mismo que con una pendiente apropiada, vierte las aguas en un depósito natural desde el cual, mediante bombeo, se recicla el agua a la planta.

En la actualidad el desagüe de la balsa —aguas clarificadas— se efectúa por medio de una estación de bombeo instalada en un zanjón excavado en el terreno para la recogida de estas aguas. El emplazamiento del mismo se va modificando en función de la proximidad de las lamas. En el futuro —fases posteriores de operación— se tiene previsto realizar este desagüe mediante una estación de bombeo flotante.

Aspectos constructivos.

La base de asentamiento de los depósitos está constituida por un recubrimiento de 1,5 a 3 m de espesor de material arcilloso resultante de la alteración de la formación de esquistos del basamento rocoso; recubrimiento que fue necesario retirar a lo largo de la franja de apoyo del dique inicial. Las investigaciones *in situ* realizadas pusieron de manifiesto la impermeabilización del terreno que forma el vaso del depósito y cimiento del dique, su gran homogeneidad a lo largo de toda la franja de apoyo del núcleo y su resistencia para soportar las cargas transmitidas por el dique.

El método de construcción empleado es el de aguas arriba, con un dique inicial de 17 m de altura (figs. 15 y 16) formado por materiales con las características siguientes:

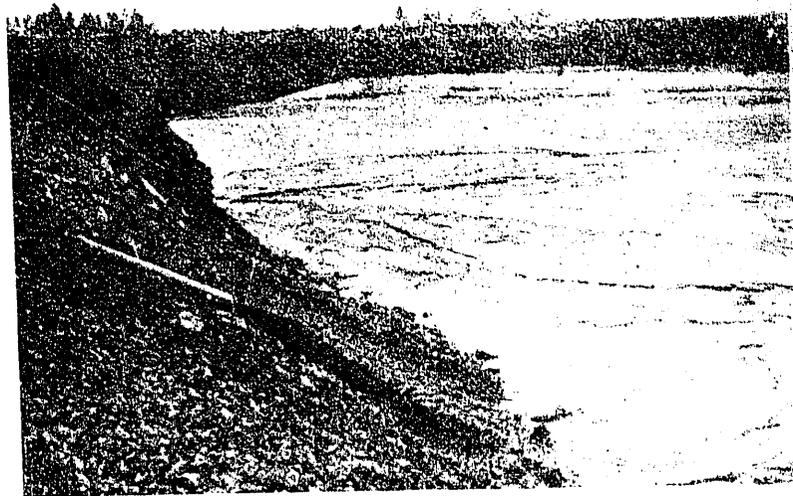


Foto 12. — Vista general del dique de estériles y mangueras de vertido-espigons.

Núcleo

Material: arcilloso.

L.L.: 30-50.

I.P.: 6.

% < # 200: superior al 30 por 100.

Tamaño máximo de piedra: 20 cm.

Densidad óptima (ensayo Proctor normal): 1,3 Tm/m³.

Humedad óptima: 18 por 100.

Escollera:

Material: anfibolita procedente del desmonte previo de la corta.

Tamaño máximo: 80 cm.

% < # 4: superior al 20 por 100.

Tamaño máximo en la zona de apoyo del filtro (escollera de transición): 40 cm.

Densidad óptima de compactación: 2,5 Tm/m³.

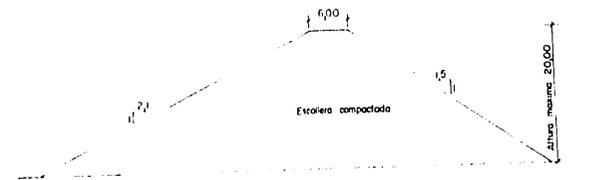


Fig. 15. — Sección media construida en muro de agua.

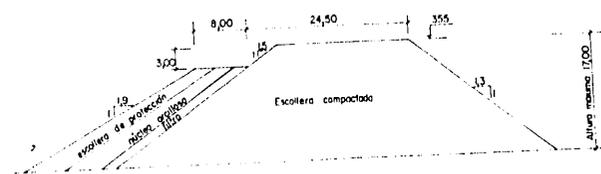


Fig. 16. — Sección media construida en dique de agua.

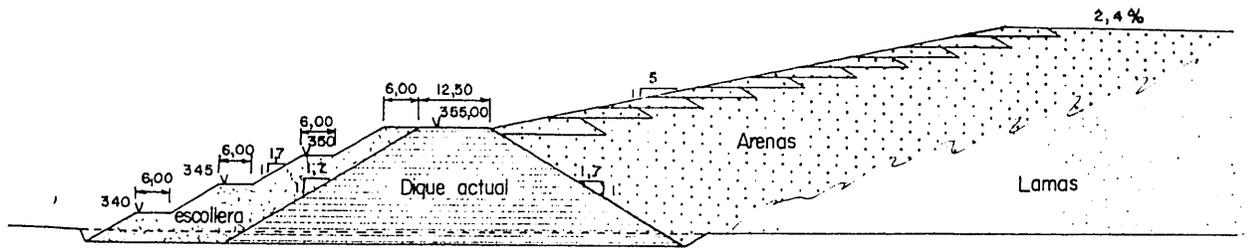


Fig. 17. — Perfil tipo de espigón central.

Filtro:

- D_{85} : 4 a 16 mm.
- D_{50} : 2 a 7 mm.
- D_{15} : 0,7 a 3 mm.

El recrecimiento se efectuará a partir del dique inicial con bermas de sección trapezoidal de 2 m de altura, que se irán formando con el material escarificado de las arenas próximas al muro (fig. 17), y con una pendiente de 5:1 para el talud exterior y una pendiente media del 2,4 por 100 para los residuos depositados.

Los residuos —muestra total— presentan características de material no plástico, una granulometría que responde a un 100 por 100 < $\#$ 10; 97 por 100 < $\#$ 40 y 40 por 100 < $\#$ 200; un peso específico de las partículas de 3,18 gr/cm³; unas características de compactación (ensayo Proctor normal) de 2,18 Tm/m³ y 14,5 por 100 para la densidad y la humedad óptima, respectivamente, y unos valores de 35° y 0 para el ángulo de rozamiento

interno y cohesión efectivas. Por otra parte, los cálculos de estabilidad dieron como coeficientes de seguridad pésimos valores de 1,65 en el dique de agua y de 1,5 para el recinto 2.

5. ESCOMBRERA DE PUMARDONGO

Consideraciones generales.

La construcción de este depósito, implantado en el valle de Pumardongo —provincia de Oviedo—, se inició en 1975, estando destinado al almacenamiento de los estériles procedentes de las actividades extractivas de las explotaciones de Hulleras del Norte, S. A. (Hunosa), explotaciones que se encuentran agrupadas en cinco zonas —todas ellas en la provincia de Oviedo—. En la construcción del depósito en cuestión se hallan implicadas las del Caudal, Turón y Aller. Los estériles del todo-uno varían entre un 30 y un 50 por 100, y su composición granulométrica viene a oscilar del 25-40 por 100 para la fracción

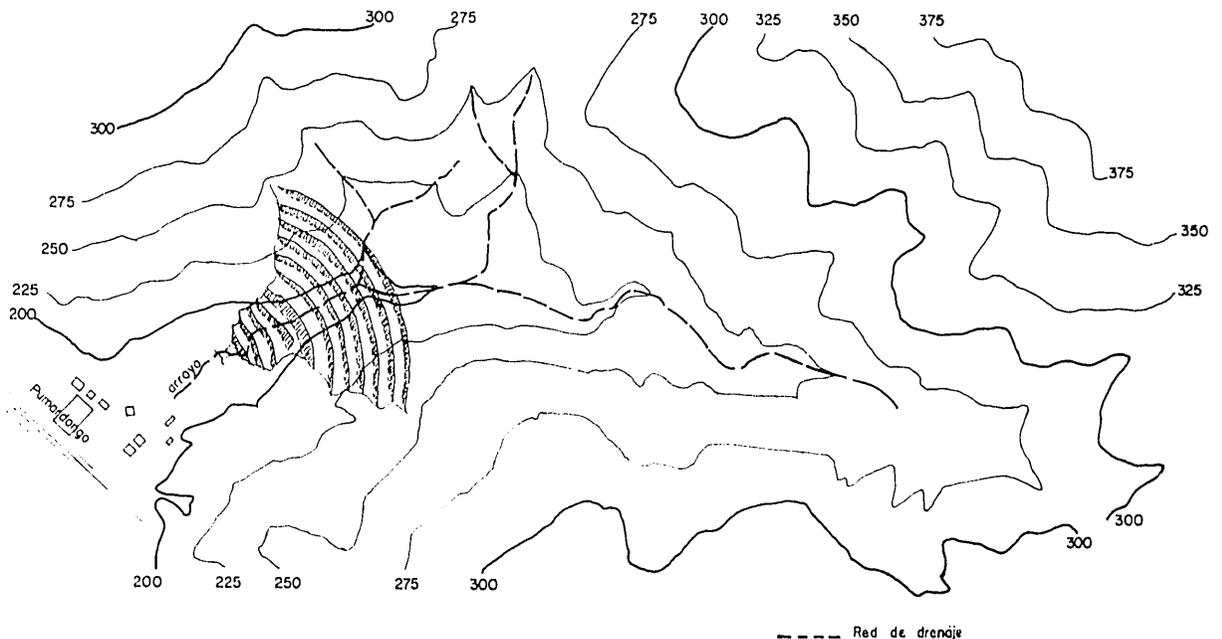


Fig. 18. — Esquema general de la zona de vertido y red principal de drenaje (fase I).

superior a 10 mm, denominados "granos" en términos de lavadero; entre el 25 y el 50 por 100 para la comprendida entre 0.5 y 10 mm, denominado "menudo", y del 20-25 por 100 para la fracción inferior a 0,5 mm, denominada "finos". Los lavaderos existentes poseen cajas tipo Baum, o bien medios densos para la fracción superior a 0,5 mm. La fracción no estéril menor de 0,5 mm se recupera en filtros de vacío posteriormente en proceso de flotación. Las colas de las celdas de flotación contienen un contenido sólido de, aproximadamente, un 7 por 100.

Aunque en principio su diseño responde al de una escombrera de carbón, en realidad debe considerarse como un depósito de tipo mixto —escombrera-balsas—, ya que se tiene previsto el aprovechamiento de los valles colaterales de los niveles superiores, de la zona de deposición, para el vertido de las colas de flotación. El lugar de asiento del depósito (fig. 18) está situado entre los niveles + 180 y 350 de un valle que, esquemáticamente, responde a una Y. Lo recorren un arroyo principal y varios subsidiarios. Una angostura viene a configurarlo en sus niveles inferiores, cerca de los cuales, además de situarse el caserío de Pumardongo, discurren vías férreas, una carretera local y el río Caudal. La superficie del valle ocupable por el mismo viene a ser de 0,8 Km².

Las pendientes de los cauces vertebrales del valle no superan los 11°, pero las laderas limitantes y divisorias alcanzan los 20° y, en tramos locales, valores más altos. Por otra parte, su emplazamiento ha estado elegido en función de las condiciones más ventajosas de: distancia de vertido, cerrada del valle, naturaleza de los terrenos de asentamiento y, fundamentalmente, posibilidad de al-

macenar 25 Mm³. El proyecto de diseño del mismo ha sido realizado por la Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras, S. A. (Enadimsa).

Sistema de vertido.

Los tonelajes depositados oscilarán alrededor del millón de toneladas por año de granos y menudos; trescientas mil toneladas por año de finos en los cuatro primeros años de operación, para alcanzar la cifra de 1,3 millones de toneladas por año y 350.000 toneladas por año, respectivamente, en años posteriores.

La capacidad de descarga y transporte de las instalaciones —por medio de cintas transportadoras— para los granos y menudos está calculada en unas 800 Tm/hora, previo almacenamiento en tolvas a nivel del terreno y, de aquí, por medio de cintas a través de torres de transbordo, al depósito o a su almacenamiento en depósitos —tolvas *ad hoc*—. Por su parte, los finos, almacenados en los valles colaterales de los niveles superiores, pasarán a los mismos por medio de tuberías, previo espesamiento de los mismos, acondicionamiento del dique inicial formado por los menudos e impermeabilización del vaso.

Sistema de drenaje.

Los resultados derivados del estudio hidrogeológico muestran un caudal máximo para la cuenca de Pumardongo de 1.65 m³/seg. y 1.65-1.80 m³/seg para la crecida centenaria y de 2,2 m³/seg para la milenaria. Por otra parte, revelaron la presencia de un acuífero en la parte inferior del valle con un coeficiente de almacena-

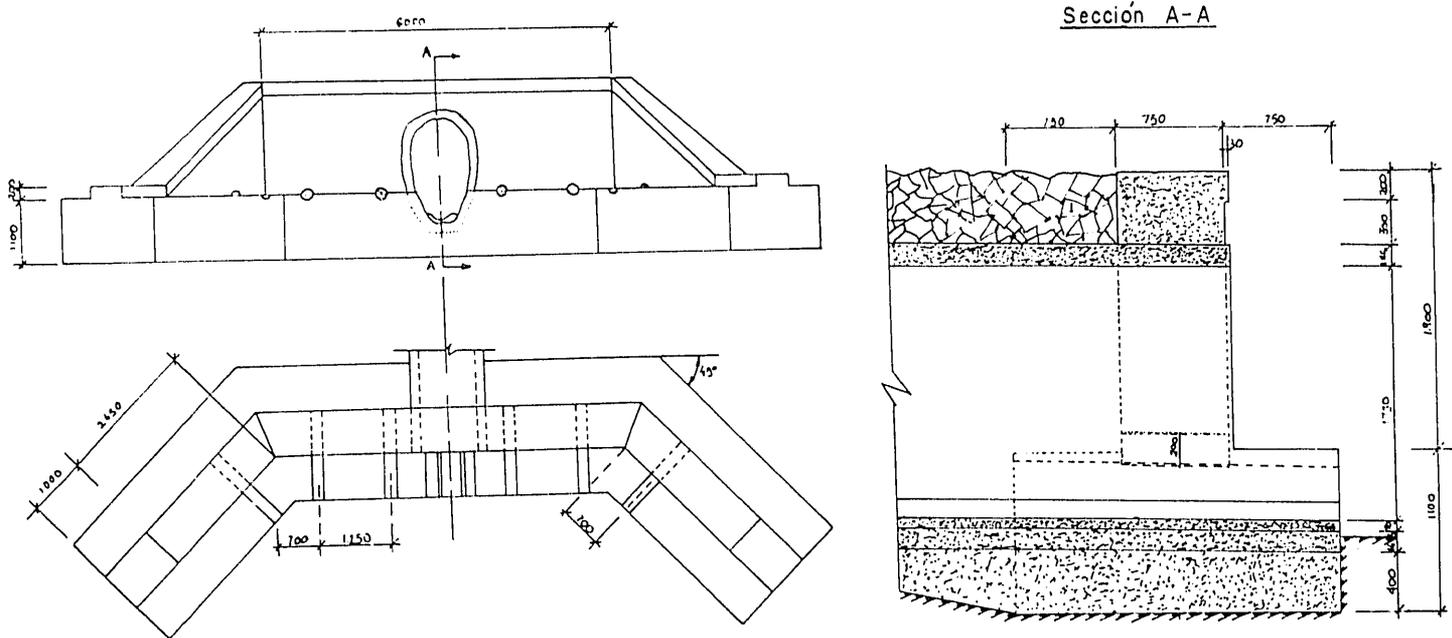


Fig. 19 — Muro frontal. Final de bóveda de la galería de drenaje.

miento de un 5 por 100 y un coeficiente de permeabilidad de 10^{-3} - $4,10^{-5}$ cm/seg. La infiltración oscila entre 70 a 80 mm, lo que representa de un 8 a un 19 por 100 de la pluviometría media anual.

Estos resultados, junto con los derivados del estudio geotécnico —permeabilidad de los residuos—, dieron lugar al establecimiento de una red de drenaje, dispuesta en los lechos de los arroyos de mayor significación del valle, que responda a unas necesidades máximas de $8 \text{ m}^3/\text{seg}$. En la figura 18 se han esquematizado los rasgos principales de dicho sistema y en la figura 19 el emboquillado del mismo, a través del muro frontal, que, prácticamente, da comienzo en el pie del depósito.

Por otro lado, se han improvisado zanjas alrededor del depósito para que tengan acceso a éstas las aguas de escorrentía del entorno y, en lo posible, las que discurrirán en los niveles más profundos del recubrimiento con valores más altos de permeabilidad. Se ha adoptado, asimismo, la disposición de lisímetros capaces de medir la infiltración en el depósito; implantación de un pluviógrafo; de un aforador Parshal, provisto de limnógrafo, a la salida del sistema general de evacuación de aguas (drenaje y escorrentía); instalación de un conjunto de depósitos de diferente capacidad y sensibilidad, con el fin de disponer de un conocimiento estadístico, en el transcurso del tiempo, de la capacidad drenante del conjunto y las ramas secundarias de la red, y complementación de tubos piezométricos, así como recomendaciones en torno a la limpieza periódica del sistema de drenaje y canalización de la escorrentía superficial y vigilancia de las granulometrías de los materiales filtrantes en torno a las labores de drenaje.

Aspectos constructivos.

La geología responde, en rasgos generales, a una alternancia de pizarras, areniscas y conglomerados que presentan una elevada competencia mecánica y un buzamiento, muy fuerte, pero poco significativo para la estabilidad del depósito. Por su parte, las discontinuidades presentes en la zona muestran una disposición también favorable. Sobre este basamento rocoso aparece un recubrimiento arcilloso con espesor variable, pero con tendencia a una cierta constancia y a mantenerse paralelo al perfil del terreno en sus líneas generales: una media de 3,40 m de espesor. El suelo posee carácter residual y permeable en la zona de contacto con el basamento rocoso.

Los resultados derivados de la caracterización geotécnica y mineralógica de los residuos y de los materiales de recubrimiento (cuadros 6 y 7), los análisis de estabilidad del depósito y de las laderas, la evolución de las presiones intersticiales en el seno de recubrimiento arcilloso según la secuencia de vertido, la influencia de las variables más relevantes —ejemplo: depresión o elevación del nivel freático— sobre la estabilidad del depósito, etc., aconsejaron la disposición de un muro en zona del pie del depósito en el que se ha retirado el recubrimiento arcilloso y compactado especialmente los residuos, así como la sustitución de este recubrimiento por materiales selectos y, parcialmente, en la zona del muro hasta una altura de 1 m.

La fase constructiva —realizada por Hunosa— se encuentra aún en labores de infraestructura. El recrecimiento del depósito se irá efectuando por bancos y en tres fases

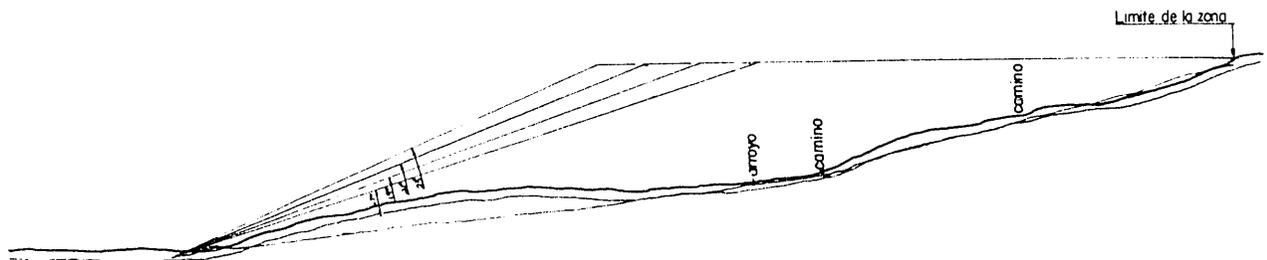


Fig. 20. — Perfil longitudinal de la escombrera.

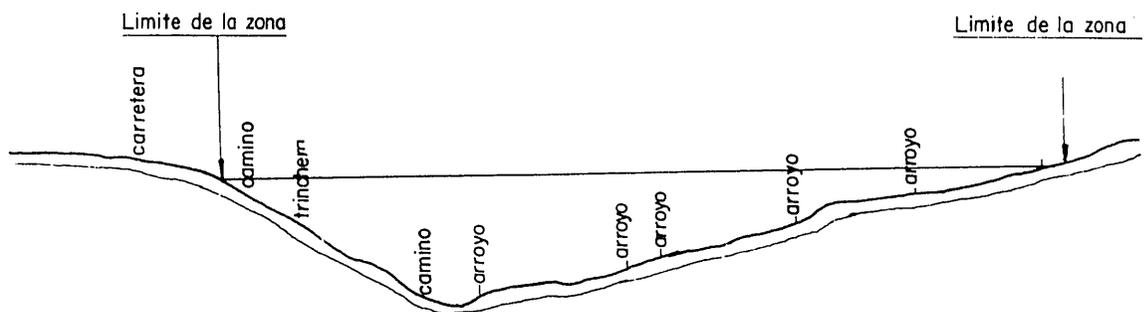


Fig. 21. — Corte transversal de uno de los valles colaterales superiores en los que se almacenaron los finos.

CUADRO 6. — Características geotécnicas de los materiales.

Material	Parámetro	Dens. aparente (gr/cm ³)	Densidad seca (gr/cm ³)	Peso específico de las partículas (grp/cm ³)	Límites		Índice de consistencia (I.C.)	Granulometría			Materia orgánica (%)		Compactac.		Permeabilidad normal (cm/seg.)	Resistencia a la compresión simple (Kg/cm ²)	Angulo de rozamiento interno (φ)	Cohesión efectiva (C)	Índice de fragilidad, I.F. (%)	Presión de preconsolidación (Kg/cm ²)
					L.L.	I.P.		% < 10	% < 40	% > 200	Dens. óptima (Tm/m ³)	Hum. óptima (%)								
Residuos	Muestras tomadas del lavadero (finos)	—	—	—	25	10	—	95	84	75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Muestras tomadas en depósitos de materiales de la misma naturaleza	2,15	2,03	—	—	—	5,5	45	17	10	13,5	2	5,5	10	—	—	33	0	0-16	—
Arcillas	—	1,74	2,74	34	14	19,42	100	95	80	—	—	—	—	1,17-2,71	30	0	—	—	0,2-0,8

CUADRO 7. — Características mineralógicas de los materiales.

Componente	M. arcilloso (%)	Cuarzo (%)	F.K. (%)	Calcita (%)	M. no crist. (%)	Caolinita (%)	Illita (%)	Clorita (%)
Muestra total	61	15	3	4	17	—	—	—
Fración < 20 μ	—	—	—	—	—	32	57	10
Muestra total	63	30	—	6	—	—	—	—
Fración entre 2 μ y 20 μ	—	4	—	—	—	14	70	11
Fración < 2 μ	—	—	—	—	—	15	65	20

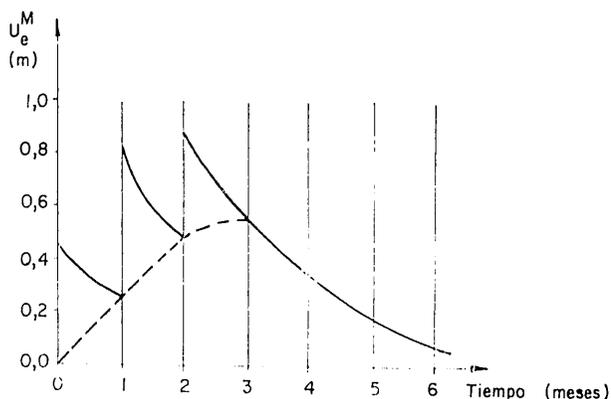


Fig. 22. — Variación de los excesos de presión intersticial en el punto M con relación a los niveles hidrostáticos en función del tiempo.

fundamentales de operación: la primera llegará hasta la cota + 250, la segunda hasta la + 300 y la tercera hasta la + 350, con un vertido realizado en tongadas de poco espesor —30 cm, aproximadamente— al fin de conseguir buenas compactaciones, dado que las características inherentes de los residuos al ser depositados, fundamentalmente en torno a la humedad, hacen difícil conseguir una compactación óptima.

Los análisis de estabilidad del depósito han dado lugar a la adopción de un ángulo de 23° como ángulo del talud más conveniente, que asegure la estabilidad del mismo —factor de seguridad pésimo 1,5—. Las figuras 20 y 21 muestran un corte longitudinal del depósito, así como uno transversal de uno de los valles colaterales superiores en los que se efectuará el vertido de los finos, en tanto que la figura 22 representa la variación de los excesos de presión intersticial en un punto, M, del recubrimiento arcilloso, con relación a los niveles hidrostáticos, en función del tiempo. La línea continua corresponde a la evolución de los excesos de presión intersticial deducidos para el proceso de carga simulado mediante escalones discretos. La línea de trazos trata de representar la evolución de dichas presiones tal como ha de producirse más probablemente en la realidad. Por otra parte, del estudio geotécnico de los residuos éstos mostraron, en la mayoría de los casos, un coeficiente de presión intersticial negativo, estando en valor más probable comprendido entre $-0,20$ y $-0,40$, creciendo de manera aproximadamente lineal con la presión lateral, pudiendo sugerirse la siguiente expresión para relacionar A_f y σ_3 : $A_f = 0,05 \sigma_3 - 0,40$ (σ_3 en Kg/cm^2).

6. PRESAS DE RESIDUOS DE MINAS DE LAZA

Esta presa, actualmente en su etapa de proyecto, está destinada al almacenamiento de los estériles procedentes de la planta de tratamiento de minerales de la explotación a cielo abierto del yacimiento de casiterita —Minas de Laza—, perteneciente a la Sociedad Agruminsa de Altos Hornos de Vizcaya, S. A., situado en el término de Laza.

en la provincia de Orense (fig. 23). El proyecto de este depósito lo está realizando la empresa Altos Hornos Ingenieros Consultores (A.H.INCO).

El todo-uno procedente de la explotación pasa a la planta de trituración, en donde se reduce a un tamaño inferior a 150 mm. enviándose posteriormente a la planta de concentración, con capacidad de 430 Tm/hora, en la que es sometido a un deslamado, a una primera clasificación volumétrica, concentración gravimétrica y, finalmente, separación magnética de los minerales, previamente secados, en tanto que los minerales no magnéticos pasan a unas celdas de flotación en donde se limpian de impurezas, principalmente arsenopirita (fig. 24).

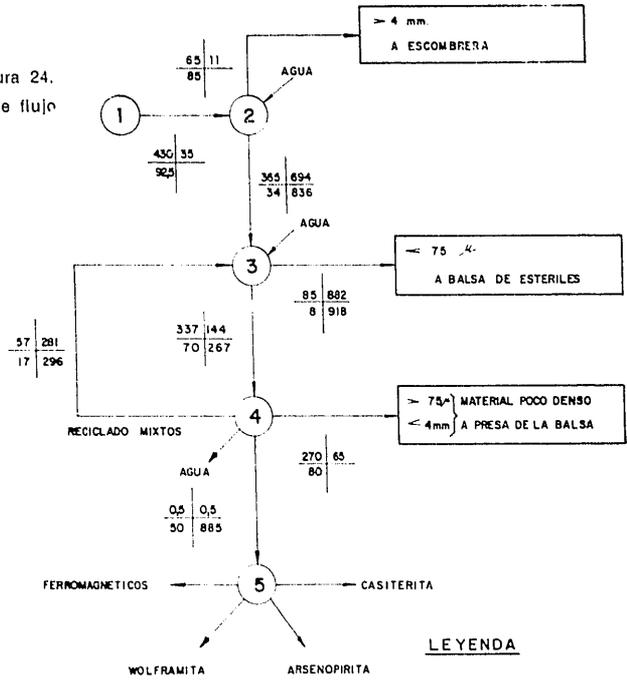
Los estériles inferiores a 75μ , con un 82 por 100 de agua, van a un tanque espesador de 24 m de diámetro, donde se separa una primera agua de reciclado y unos lodos que con un 65 por 100 de agua pasan a la presa de estériles por medio de tuberías. Por su parte, las arenas procedentes del rechazo de la concentración gravimétrica —superiores a 75μ , inferiores a 4 mm— se envían, previo espesamiento, por medio de cintas transportadoras a la zona de arenas del depósito de estériles formando el dique del mismo. El agua resultante del espesamiento de estas arenas pasa a un tanque espesador —número 2— de 24 m de diámetro; el agua clarificada de los dos tanques va al depósito de agua de recirculación, las figuras 25 y 26 muestran la evolución del volumen almacenado y cotas alcanzadas en función de los años de operación.

La planta tiene un complejo sistema de instalaciones hidráulicas, necesarias para el funcionamiento del lavadero, cuya demanda de agua es de $2.010 \text{ m}^3/\text{hora}$. La instalación básica es el depósito general de agua de recirculación, de capacidad de 10.000 m^3 . Este depósito se alimenta con $1.760 \text{ m}^3/\text{hora}$ procedentes de los tanques espesadores, $80 \text{ m}^3/\text{hora}$ procedentes de la balsa de residuos, tras una primera decantación de los lodos, y $170 \text{ m}^3/\text{hora}$ de aportaciones nuevas al río Tâmega (figura 27).

Es interesante destacar que las cifras anteriormente citadas son cifras medias, procedentes de ensayos con material de la mina, pero susceptibles de variaciones, que pueden llegar a un 15 por 100.

Por otra parte, es probable que el caudal del río Tâmega sea insuficiente en estiaje para aportar los metros cúbicos necesarios, en especial al no poderse hacer ningún tipo de regulación en el río, y a su vez estos estiajes pueden coincidir con evaporaciones superiores a las aportaciones por lluvias en la balsa. Estos problemas se resuelven usando la balsa de residuos como presa de regulación, lo que es posible después de los seis primeros meses de funcionamiento de la explotación, y poder por ello recoger cantidades importantes de agua, del orden de los 100.000 m^3 , procedentes de las épocas de lluvia y de caudales abundantes en el río; esta regulación permite afrontar estiajes de un mes de duración, superiores a los máximos experimentos en la región durante los últimos diecisiete años.

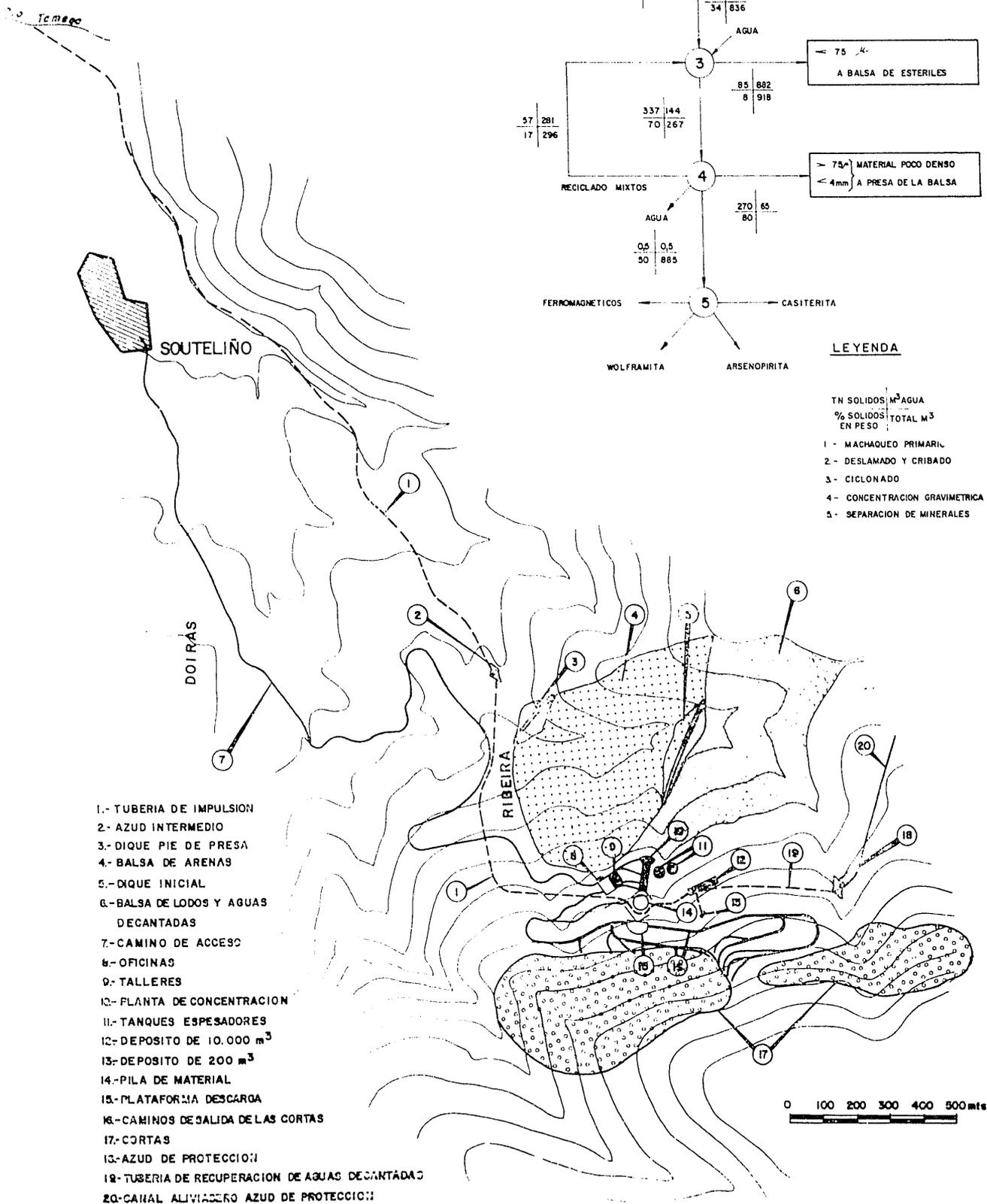
Figura 24.
Diagrama de flujo



LEYENDA

TN SOLIDOS / M³ AGUA
% SOLIDOS / TOTAL M³
EN PESO

- 1 - MACHAQUEO PRIMARIL
- 2 - DESLAMADO Y CRIBADO
- 3 - CICLONADO
- 4 - CONCENTRACION GRAVIMETRICA
- 5 - SEPARACION DE MINERALES



- 1.- TUBERIA DE IMPULSION
- 2.- AZUD INTERMEDIO
- 3.- DIQUE PIE DE PRESA
- 4.- Balsa de ARENAS
- 5.- DIQUE INICIAL
- 6.- Balsa de LODOS Y AGUAS DECANTADAS
- 7.- CAMINO DE ACCESO
- 8.- OFICINAS
- 9.- TALLERES
- 10.- PLANTA DE CONCENTRACION
- 11.- TANQUES ESPESADORES
- 12.- DEPOSITO DE 10.000 m³
- 13.- DEPOSITO DE 200 m³
- 14.- PILA DE MATERIAL
- 15.- PLATAFORMA DESCARGA
- 16.- CAMINOS DE SALIDA DE LAS CORTAS
- 17.- CORTAS
- 18.- AZUD DE PROTECCION
- 19.- TUBERIA DE RECUPERACION DE AGUAS DECANTADAS
- 20.- CANAL ALIVIADERO AZUD DE PROTECCION

Fig. 23. — Planta general.

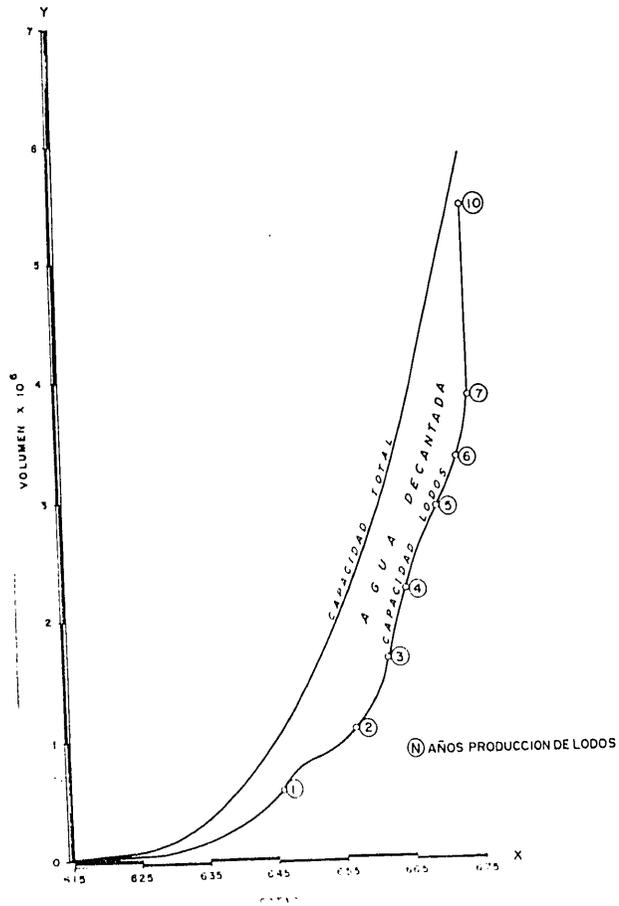


Fig. 25. — Balsa de lodos.

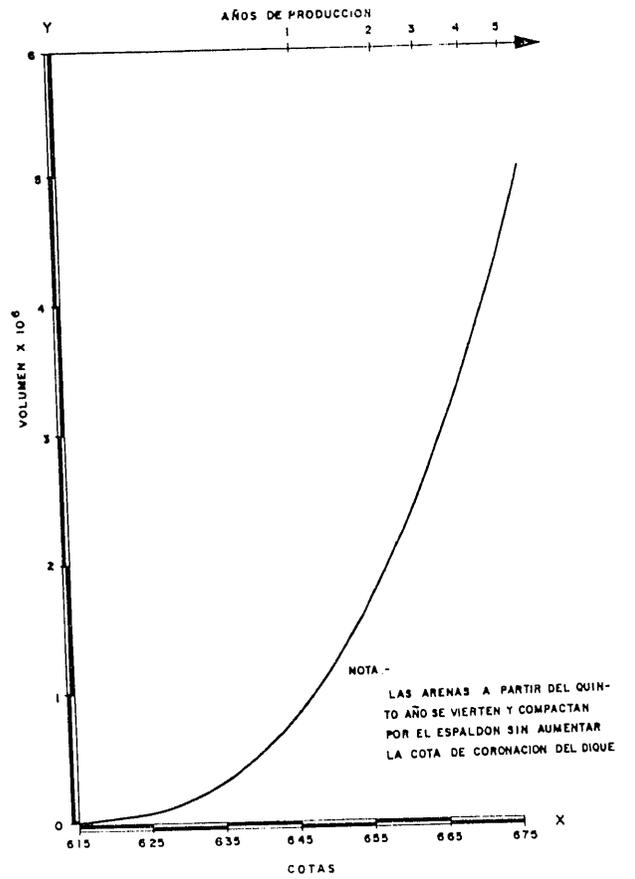


Fig. 26. — Volúmenes de arenas (altura máxima con una berma de 10 metros).

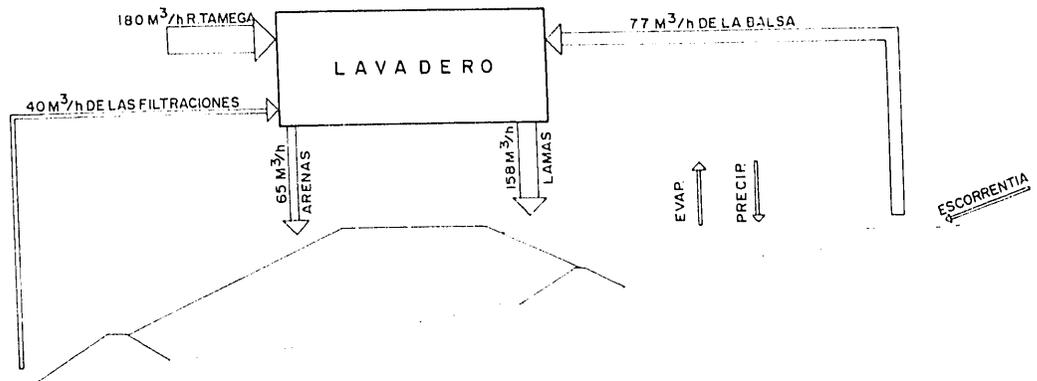


Fig. 27. — Balance de aguas.

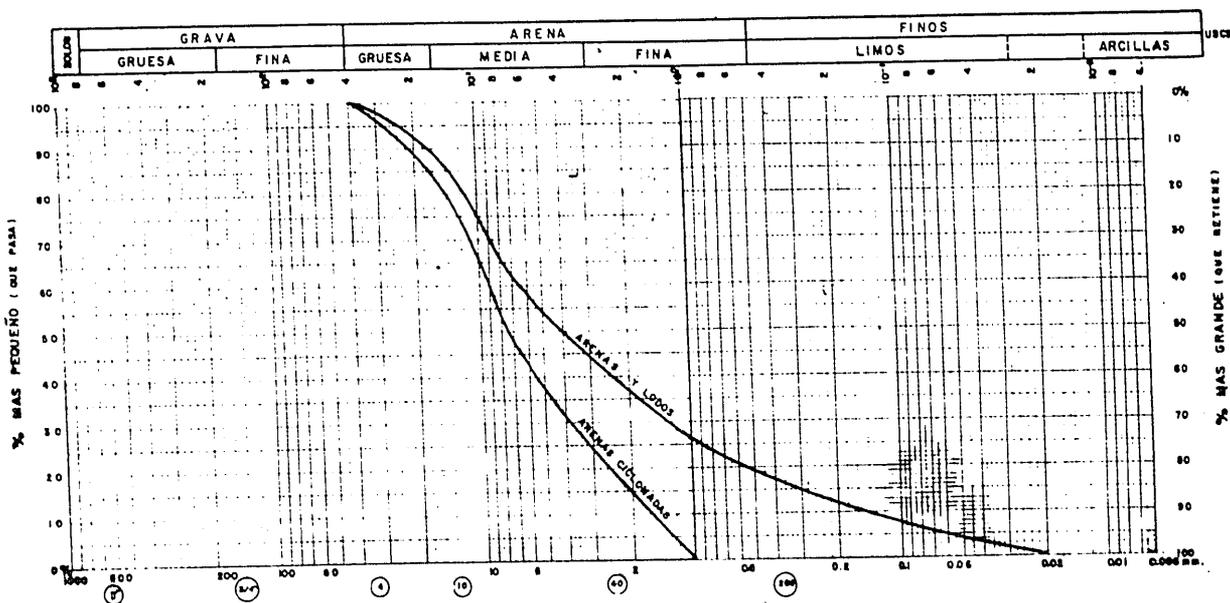


Fig. 28. — Curva granulométrica.

Teniendo en cuenta las granulometrías de los materiales (fig. 28), los volúmenes respectivos (figs. 25 y 26) y su distribución anual, la balsa de estériles quedaba muy condicionada en su morfología si se consideraban, además, las necesidades de espacio y la conveniencia de limitar las alturas de dique a valores razonables.

En principio se pudo apreciar la notable desproporción entre los gruesos arenosos y los lodos, predominando casi más el carácter de escombrera sobre el de balsa. El perfil definitivamente adoptado ha sido el de la figura 29. Evidentemente, la gran anchura del dique no viene impuesta por razones de estabilidad, sino por la necesidad de albergar un volumen muy considerable de arenas.

Para retener los lodos del primer año de explotación se construye un dique de escollera, aprovechando los materiales no aprovechables procedentes de la montera de la corta y cuyo coste es relativamente bajo.

El proceso de formación de la balsa se continúa con la secuencia indicada en la figura, sin que se prograse en altura a partir del quinto año.

Las arenas se extienden a partir de la cinta de vertido mediante un *bulldozer*, aplicándose una ligera compactación mediante rodillo vibratorio con el fin de mejorar la estabilidad frente al sifonamiento, favorecer la expulsión de agua y mejorar la resistencia al corte. Se ha contado con un ángulo de rozamiento interno de 34°. El coeficiente de seguridad del talud de arenas se ha fijado como mínimo en $F = 1.5$. Aunque en la zona no son de prever efectos sísmicos y la incidencia de las voladuras es muy pequeña, la proximidad del vecino pueblo de Souteliño obliga a la adopción de las mayores precauciones.

Por estas mismas razones, a partir del quinto año se inicia también la construcción de un segundo dique de

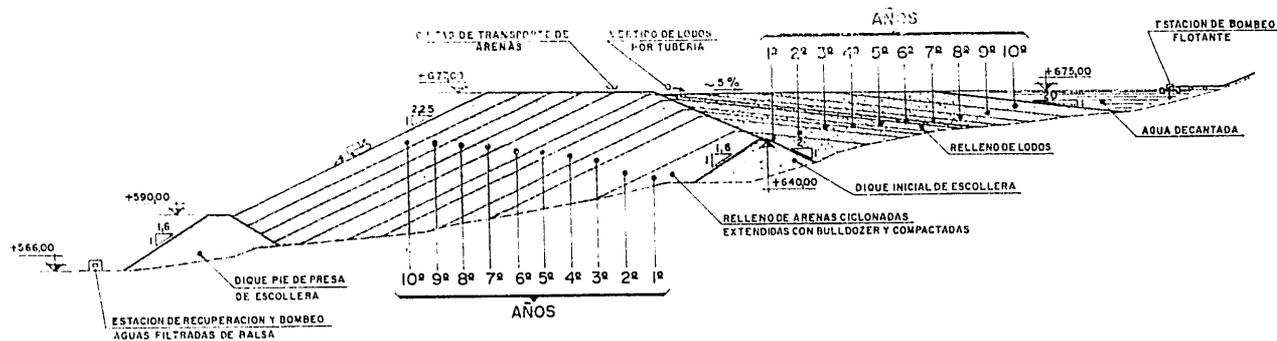


Fig. 29. — Sección transversal balsa de estériles.

0 50 100 m

escollera, al pie de las arenas, para mejorar la contención y puesta en obra de las mismas.

A este dique van a parar también todas las filtraciones procedentes de los lodos y arenas, así como las captadas de algunos pequeños manantiales que afloran en el vaso. Estas aguas son bombeadas nuevamente al lavadero para su reciclaje.

El resguardo existente en todo momento entre el nivel de lodos y la coronación del dique de arenas se ha fijado en un mínimo de 1,50 m. La eventualidad de una riada sobre la balsa queda prácticamente evitada por el azud de cabecera conectado a un canal de desvío.

Para la recuperación de las aguas decantadas en la balsa se ha previsto una instalación de bombeo flotante, desplazable sobre la misma. En las estimaciones de caudales se ha considerado un índice de poros final de los lodos de 2-2,5, con un peso específico total de 1,47 Tm/m³. El peso específico de las partículas minerales es de 2,65 Tm/m³. Se ha estimado en unos 3° el talud medio final de decantación de los lodos.

7. INCIDENCIA DE ESTOS DEPOSITOS EN OBRAS DE INGENIERIA CIVIL. PRESA DE RESIDUOS DE LA MINA "ABANDONADA"

Aspectos generales.

Esta presa de residuos, situada al sur de Bilbao, en la ladera de Larrasquitu, respondió en su día al almacenamiento de los estériles de la planta de tratamiento de los óxidos de hierro procedentes de la explotación de la mina Abandonada, de Lezama —Leguizamón, S. A.—. Fue abandonada en 1970, después de sesenta años de operación, cobrando de nuevo un gran interés como consecuencia de la necesidad de recuperación del espacio

por ella ocupado —total o parcialmente— a causa de las obras de la Solución Sur de Bilbao, uno de cuyos tramos —avenida de José Antonio-Basauri— discurría inicialmente sobre la misma, entre los puntos kilométricos 1,300 y 1,900.

La presa se encuentra ubicada en una vaguada natural en donde eran vertidos los lodos procedentes del lavadero, a través de canales de chapa y con una concentración del 30 por 100 de sólidos, efectuándose la descarga directamente en el punto final de la conducción. Fue construida con dique de pedraplén en un 80 por 100 de su altura, 17 m en la parte central de la vaguada, con un talud exterior de 45° y una anchura en su coronación de 3 m. El drenaje se realizaba mediante dos colectores de fondo con sus respectivas chimeneas-aliviadero terminales, que han quedado totalmente cegadas.

Este depósito se compone de una corteza superficial, con espesor que varía de 0,70 a 1 m, de material limoarcilloso seco. Debajo de ella se extienden varias capas del mismo material con humedades altas, pero variables según la profundidad. Todo este depósito de suelo limoarcilloso descansa sobre un lecho de margas compactas, ocupando una superficie aproximada de 40.000 m² y un volumen estimado de almacenamiento de 300.000 m³. La figura 30 muestra un corte transversal de la balsa entre los puntos kilométricos del tramo referido.

El estudio geotécnico, con vistas a la posibilidad de recuperación, fue realizado por el Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo.

Posibilidades de recuperación.

Fue necesario afrontar el problema en un doble aspecto:

- Estudio geotécnico detallado del depósito.
- Disminución de los tiempos de espera.

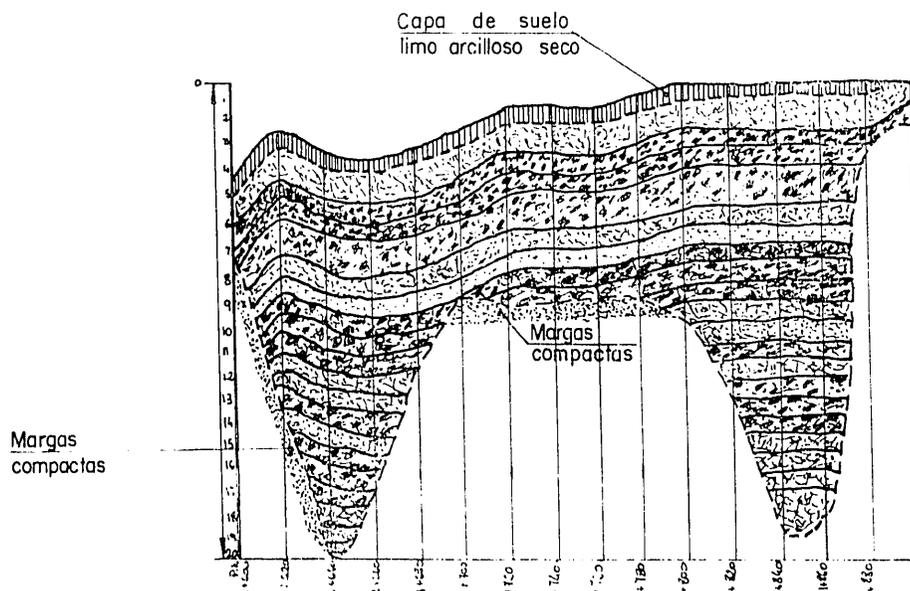


Fig. 30. — Corte transversal de la balsa.

Densidad seca: 1,22 gr/cm ³ Peso específico: 2,90 gr/cm ³ Humedad natural: 41 % Limite líquido (L.L.): 50 Indice de plasticidad (I.P.): 15 % que pasa 4: 95 % que pasa 40: 88 % que pasa 200: 82 Coeficiente de compresibilidad, C _c : 0,31 Coeficiente de consolidación, C _α : — Cargas pequeñas: 6 · 10 ⁻¹ cm ² /seg. — Cargas grandes: 10 ⁻¹ cm ² /seg.	Coeficiente de permeabilidad (k): — Permeabilidad normal (K _n): Inalteradas: 10 ⁻⁷ cm/seg. Remoldeadas: 2,91 · 10 ⁻⁸ cm/seg. — Permeabilidad radial (k _r): Inalteradas: 7,5 · 10 ⁻⁷ cm/seg. Remoldeadas: 5 · 10 ⁻⁷ cm/seg. Características resistentes: — Compresión simple: Inalteradas: 0,75 Kg/cm ² Remoldeadas: 0,50 Kg/cm ² — Triaxiales: Angulo de roza int., φ: 25° Cohesión (c): 0,1 Kg/cm ² — McLinete (vane test): Inalteradas: 0,09 Kg/cm ² Remoldeadas: 0,03 Kg/cm ²
---	---

El análisis de los resultados obtenidos en el laboratorio muestra unas propiedades, para el material que rellena la balsa, de características semejantes a las de una arcilla (cuadro 8). Los residuos recién depositados

son muy blandos y presentan un alto grado de sensibilidad tixotrópica. Por otra parte, el tiempo necesario para alcanzar el 90 por 100 de la consolidación es excesivo, necesiéndose obligatoriamente reducir el mismo para que

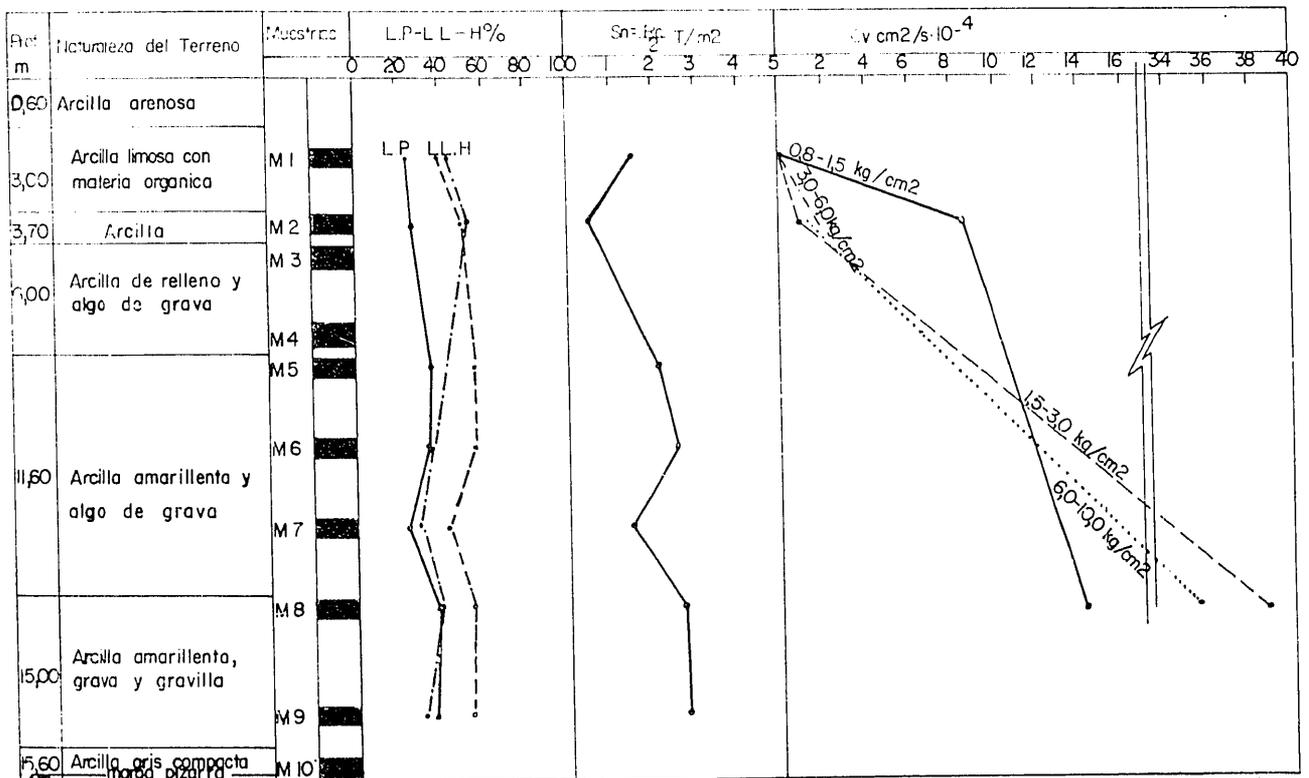


Fig. 31. — Variación de diferentes parámetros geotécnicos con la profundidad.

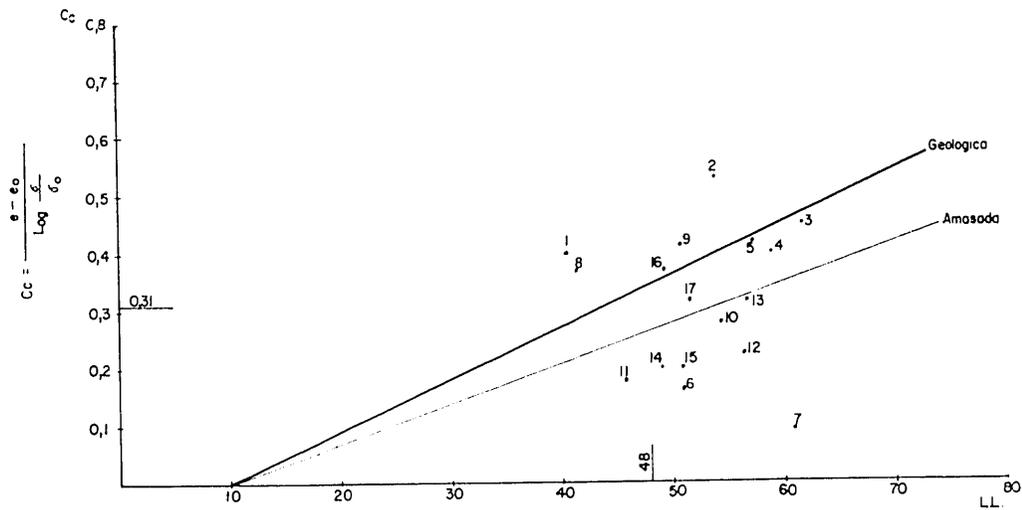


Fig. 32.—Variación del índice de compresibilidad en función del límite líquido

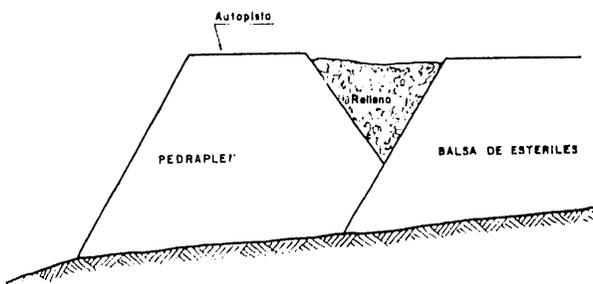


Fig. 33.—Representación esquemática perfil de la solución adoptada.

los elevados asentamientos que se producen, como consecuencia de la implantación del terraplén y de peso del propio depósito, sean alcanzados dentro del tiempo previsto para la iniciación de esta vía de acceso.

La figura 31 muestra las variaciones de alguna de las propiedades de los materiales, en tanto que en la figura 32 se representa la variación del índice de compresibilidad con el L.L.

Las consideraciones expuestas y las necesidades del proyecto impusieron la obligatoriedad de un estudio exhaustivo de las diferentes alternativas para acelerar el proceso de consolidación. De los procedimientos normal-



Fig. 34.—Representación esquemática en planta de la situación actual.

Obra	Roca	% CO ₂ C _v	Desgaste Los Angeles	Absorción	Pérdida a los sulfatos		Proctor y C.B.R. del material que pasa por el tamiz 3/4"				Finos (pasa tamiz 4)			
					Sódico	Magnésico	% pasa	Proctor		C.B.R.	% pasa	L.L.	I.P.	L.P.
								H. óptima	D. máx.					
Pedraplén de Lezama (Solución Sur) (1971-72)	Margas calcáreas cretácicas	45-60	(A)25	0,60	2,31	2,61	20	2	2,105	30	15	21,3	13,1	8,2

mente empleados para acelerar dicho proceso —sobrecarga del terraplén, sustitución total, penetración total o parcial por materiales de buena calidad y disposición de drenes de arena— las características especiales de los residuos y del propio recinto hacen antieconómicos la aplicación de algunos de dichos procesos.

En principio se analizó la solución de disposición de los drenes de arena, al tresbolillo, a diferentes espaciamientos por este proceso se obtuvieron resultados francamente esperanzadores, reducción del tiempo de espera en el caso más favorable a 1/36 partes del derivado inicialmente para alcanzar el 90 por 100 de la consolidación, repetidas consideraciones en torno a la naturaleza de los residuos y dificultades operacionales de esta técnica dio como resultado que se desechase esta solución.

La solución finalmente establecida y llevada a la práctica ha consistido en la construcción de un extenso y potente pedraplén adosado parcialmente al muro de contención de la balsa (fig. 33), lo que ha supuesto modi-

ficar ligeramente el trazado inicial de la carretera. La figura 34 representa, en planta, la situación actual.

Dicho pedraplén está constituido por materiales margosquistosos y calizos —margas calcáreas cretácicas—, cuyas características se exponen en el cuadro 9, llevándose a cabo su realización compactando estos materiales con espesores de tongada de 70 a 110 cm, empleando compactadores vibrantes tipo Weller —peso estático 12,5 Tm— y con un número de pasadas de seis a diez. La construcción fue ejecutada por Ferrovial, y la dirección de la obra corrió a cargo de la 3.ª Jefatura Regional de Carreteras. En las fotografías 13 y 14 puede observarse el estado actual de dicho tramo de autopista.

8. PRESERVACION DEL PAISAJE. PRESAS DE RESIDUOS DE MINAS DE REOCIN

Si bien es cierto que en el caso de depósitos de esta naturaleza se plantean imprevistos técnicos y económicos que desbordan por su importancia a los que se pueden



Foto 13. — Vista parcial de la situación actual.

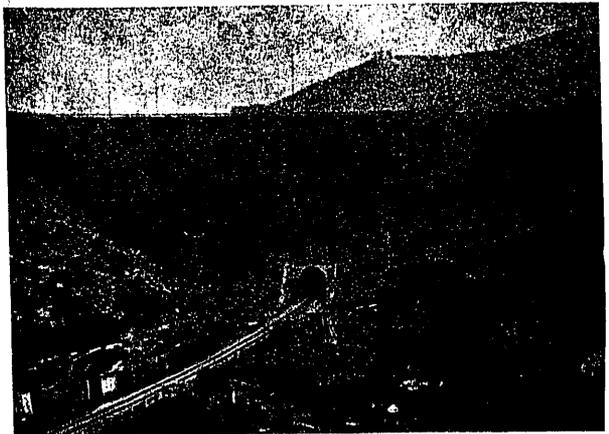


Foto 14. — Vista del pedraplén.

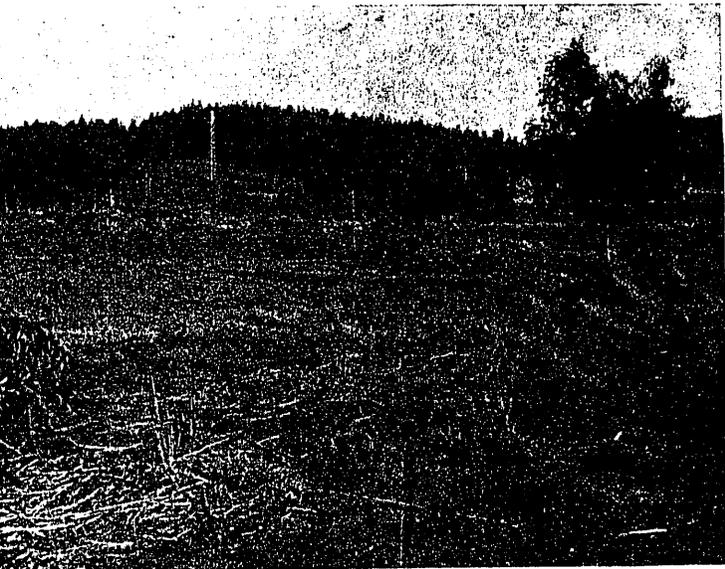


Foto 15. — Repoblación variada en la superficie del dique de Torres.



Foto 16. — Repoblación variada y encespamiento en la superficie del dique de El Mazo.

Pondal, y en la actualidad se están llevando a cabo por técnicos de la propia empresa.

En la superficie de estas presas se ha recurrido al método de plantación de encespamiento mediante la siembra de césped de carácter leguminoso —trébol—, graminéas —ryegrass— y, asimismo, a la repoblación variada, que ha consistido en repoblar con diferentes clases de árboles, sauces y arbustos (fotos 15 y 16), sobre el suelo fértil creado previamente sobre la escombrera y formado por un suelo procedente de zonas de excavaciones próximas, sobre el que se expande un suelo de buena calidad, en un espesor de unos 20 cm (foto 17).

La siembra se efectúa preferentemente en octubre después de aplicar al terreno dosis adecuadas de abono, con el fin de proporcionar a las plantas robustez y un excelente equilibrio fisiológico.

Por otra parte, en los muros —paredes— de estos depósitos se ha recurrido al método de plantación de pinos, mediante la ejecución de agujeros rellenos de suelo de buena calidad, y profundidad adecuada, con

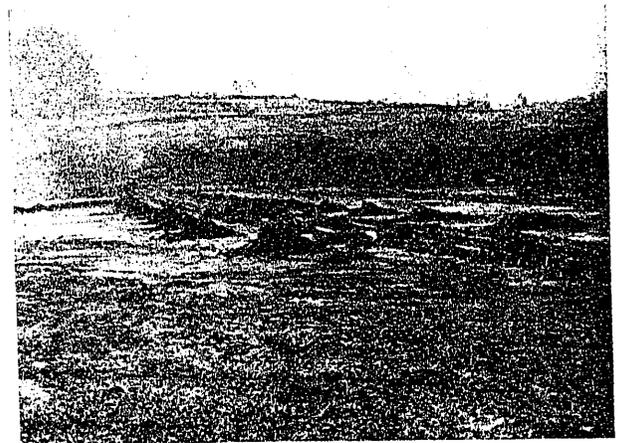


Foto 17. — Labores previas de preparación de un suelo fértil en la superficie del dique de La Garna.

derivar de una visión puramente estética del paisaje; sin embargo, cuando, a la vez de preservar el paisaje, se prevén las medidas oportunas que puedan, de una parte, coadyuvar a la estabilidad del propio depósito, evitando los efectos de la erosión, y, de otra, obtener beneficios del reacondicionamiento de un suelo estéril, hace que se pueda abordar la defensa del paisaje no sólo como un problema estético y ambiental, sino también como una solución práctica que contemple las soluciones técnicas o restituya un suelo a un estado de utilización potencial.

Un ejemplo típico de estos aspectos lo constituyen las labores llevadas a cabo en las presas de residuos, ya abandonadas, de las minas de Reocín. Los métodos de plantación, sistemas de implantación de un suelo de cobertura sobre estos depósitos y técnicas de plantación fueron estudiados por el ingeniero de Montes don Luis



Foto 18. — Aspectos de la plantación de pinos efectuada en el dique de Torres. Zona del muro de contención.

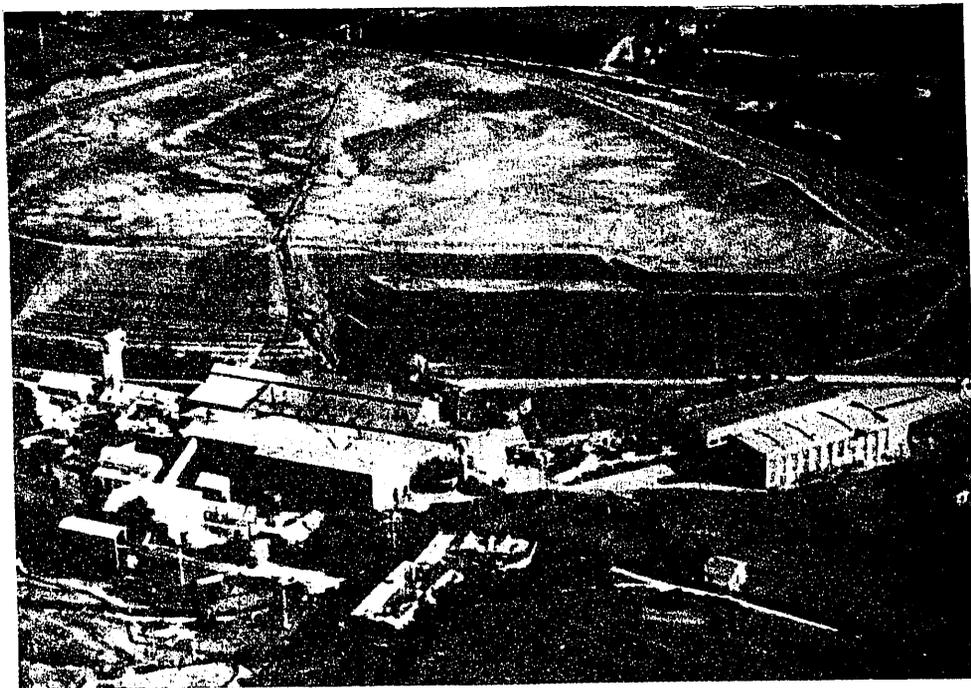


Foto 19.—Estado inicial del dique de Torres.

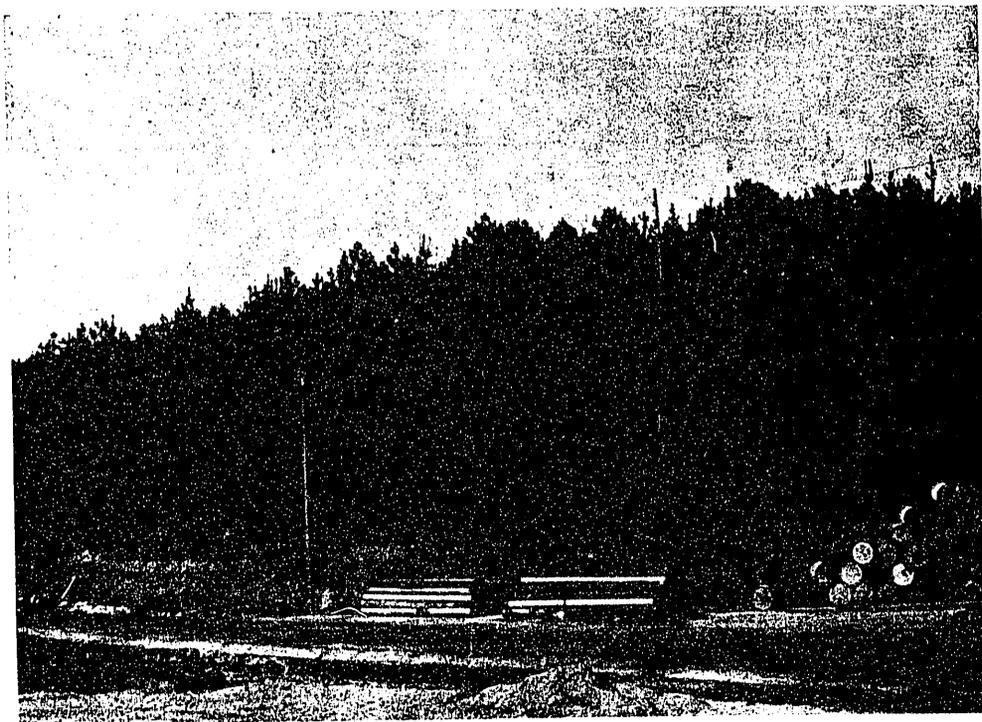


Foto 2.—Vista parcial del estado actual del dique de Torres. Zona del muro de contención.

el fin de que sus raíces, en general, no lleguen a estar inmersas completamente en el suelo estéril del depósito. La plantación realizada es bastante prieta, aproximadamente de $1,40 \times 1,40$ m, con unas 5.000 plantas por hectárea, lo que permite disminuir la competencia, a veces muy viva, de la vegetación herbácea (foto 18).

No se trata con este sistema de dar lugar a una producción forestal, sino la de crear un ambiente de bosque, para lo que se han trazado senderos e improvisado todo aquello que ayuda a mejorar el ambiente.

Las fotografías 19 y 20 muestran la situación inicial y actual de la escombrera de Torres.

CUADRO 10

Muestra núm.	pH	T ^a	Fe	Pb	Zn	Cu	Cl ⁻	As	Cr	Cd	Mn	Hg
		°C	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
11/9	6,7	34	0,60	4,40	2,9	1,1	403,46	0,20	0,50	0,04	0,07	0,2
12/9	6,6	32	1,20	0,7	1,9	0,2						
13/9	6,6	35	0,80	2,5	36,0	0,06						
14/9	6,5	35	1,30	4,5	80,0	0,02						
15/9	6,6	39	1,30	9,3	83,0	0,03						
16/9	6,3	37	1,10	7,3	141,0	0,01						
17/9	6,7	38	1,40	7,4	128,0	0,01						
18/9	6,2	38	1,60	6,4	88,0	0,02						
19/9	6,2		2,00	11,0	150,0	0,02	57,79	0,45	0,05	0,19	4,30	0,2
20/9	6,1	27	1,50	5,0	152,0	0,02						
21/9	6,0	27	2,30	6,0	117,0	0,03						
22/9	6,1	27	2,10	6,0	116,0	0,02						
23/9	6,2	27	0,90	6,0	114,0	0,03						
24/9	6,2	27	2,20	7,0	119,0	0,03						
1/10	6,3	27	1,90	7,0	127,0	0,03						
2/10	6,3	27	1,60	7,0	140,0	0,03						
3/10	6,3	27	1,60	9,04	132,0	0,04						
4/10	6,5	27	0,90	5,0	113,0	0,02	106,36	0,30	0,05	0,18	37,0	0,2
5/10	8,6	27	0,30	0,6	0,6	0,06						
6/10	9,8	27	0,20	0,3	0,3	0,05						
7/10	11,2	27	1,40	4,0	0,8	0,05						
8/10	11,4	29	0,30	0,3	0,5	0,05						
9/10	10,9	33	0,20	0,3	0,2	0,04	354,53	0,10	0,05	0,05	0,07	0,2
10/10	11,4	35	0,20	2,2	0,3	0,03						
11/10	11,8	30	0,30	2,0	0,6	0,07						

9. CONTAMINACION POR LOS EFLUENTES DE ESTOS DEPOSITOS. EVALUACION DE LOS DE LA FUTURA PRESA DE RESIDUOS DE MINA DE AZNALCOLLAR

Como ejemplo significativo de la importancia que los aspectos ecológicos tienen fundamentalmente respecto a la posible contaminación de los cauces naturales de

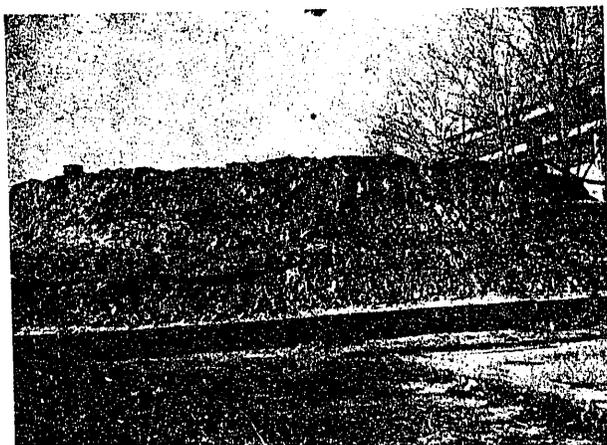


Foto 21. — Vista parcial del dique experimental.

CUADRO 11

CALIDAD PREVISTA DE LAS AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DEL PROCESO DE FLOTACION	
Determinación	Concentración
Temperatura.	Temperatura ambiente (1)
pH.	10,9-11,8 (2)
Oxígeno disuelto, % saturación.	50 (1)
Cloruros, mg/l.	350
Hierro, mg/l.	0,2-0,3
Plomo, mg/l.	0,3-2,8
Cinc, mg/l.	0,2-0,6
Cobre, mg/l.	0,03-0,07
Arsénico, mg/l.	0,10
Cromo, mg/l.	< 0,05
Cadmio, mg/l.	0,05
Manganeso, mg/l.	0,07
Mercurio, mg/l.	< 0,2

(1) Medida efectuada tras un periodo de decantación.

(2) Se refiere al pH de salida del proceso de flotación; lógicamente tras el periodo de decantación en el dique de retención de estériles el pH disminuirá.

agua o subterráneos por los efluentes de estos depósitos —en los programas de planificación y diseño, exponemos esquemáticamente los estudios efectuados con miras a una evaluación preliminar, de los posibles efluentes del futuro dique de estériles de la explotación minera de Aznalcóllar, de Andaluza de Piritas, S. A., en la provincia de Sevilla. Dichos estudios fueron llevados a cabo por la Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras, S. A. (ENADIMSA).

El proyecto consistió en tratar por flotación diferencial, en planta piloto, los sulfuros complejos procedentes de dicha explotación minera. Los estériles del citado proceso se depositaron en un dique experimental para su decantación, diseñado especialmente para tal efecto (foto 21).

Dado que el proceso determinante para la calidad de las aguas residuales es la flotación del mineral, se efectuó una toma de muestras horarias durante veinticinco horas consecutivas, variando las condiciones de pH y temperatura en el proceso (cuadro 10).

De los datos aportados se dedujo la calidad prevista para las aguas residuales a la salida del dique, habida

cuenta de la posible no variación de los contenidos en metales no tóxicos (cuadro 11).

Finalmente puede señalarse, por un lado, que aunque en el proceso se produce un aumento de temperatura de 7-8° C, el tiempo necesario para la decantación de sólidos en el dique tiene como consecuencia que el vertido del agua decantada se realice a temperatura ambiente y, por otro, los ensayos realizados son demostrativos del papel determinante del pH en la concentración final de metales pesados, debiéndose controlar entre valores de 10,8 y 11,8 para mantener concentraciones mínimas de esos elementos.

Por otra parte, los contenidos en oxígeno disuelto, del orden del 50-75 por 100 de saturación, permitieron aseverar la ausencia de concentraciones significativas de sustancias orgánicas en los vertidos, ni de sustancias nitrógenadas en forma reducida (amoníaco, cianuros), en tanto que los metales pesados y sustancias tóxicas, podrán mantenerse con concentraciones que no sobrepasen valores significativos, controlando debidamente el pH en el proceso de flotación y en el dique de retención de estériles.