

## ÍNDICE

	<i>Págs.</i>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	13
<b>2. YACIMIENTOS MINEROS DE ESPAÑA.....</b>	15
2.1 Principales menas y depósitos de minerales metálicos de España .....	15
2.2 Principales yacimientos de carbón en España .....	19
2.3 Rocas ornamentales .....	20
2.3.1 Yacimientos de Granito .....	20
2.3.2 Yacimientos de mármol y caliza marmórea .....	21
2.3.3 Yacimientos de pizarra .....	21
<b>3. TIPOLOGÍA DE LAS ESTRUCTURAS DE RESIDUOS MINEROS.....</b>	23
3.1 Escombreras.....	23
3.2 Pilas de lixiviación y vertederos de lixiviación (Heap leaching y Dump leaching) .....	25
3.3 Estructuras de relleno hidráulico de lodos .....	27
3.3.1 Presas de lodos .....	29
3.3.1.1 Presas de materiales sueltos .....	30
3.3.1.2 Presas mixtas.....	30
3.3.1.3 Presas con diques de arenas ciclonadas .....	30
3.3.1.3.1 Clasificación por método de recrecimiento .....	31
3.3.1.3.2 Clasificación por ubicación.....	33
3.3.1.3.3 Clasificación por punto de vertido .....	34
3.3.1.3.4 Clasificación por sistema de drenaje.....	35
<b>4. PROBLEMÁTICA DE LA ESTABILIDAD FÍSICO-QUÍMICA DE LAS ESTRUCTURAS MINERAS .....</b>	37
4.1 Estabilidad física o geológica .....	37
4.2 Contaminación química de aguas continentales .....	39
4.2.1 Efectos de las aguas ácidas de mina sobre los ecosistemas acuáticos .....	44
4.2.2 Clasificación de las aguas ácidas.....	46
4.3 Sustancias utilizadas en las plantas de concentrado o beneficio de minerales .....	46
<b>5. ESTABILIDAD DE ESCOMBRERAS .....</b>	49
5.1 Calculo de la peligrosidad .....	55
<b>6. ESTABILIDAD DE PILAS DE LIXIVIADO.....</b>	61
6.1 Estabilidad física o geológica .....	61
6.1.1 Cálculo de la peligrosidad física o geológica.....	63
6.2..Contaminación química .....	66

<b>7. ESTABILIDAD DE PRESAS DE LODOS .....</b>	71
7.1 Funcionamiento hidráulico de una presa de residuos .....	71
7.2 Fallo de las presas de residuos mineros .....	72
7.2.1 Mecanismos de fallo de las presas de lodos de flotación .....	74
7.2.1.1 Deslizamiento .....	74
7.2.1.2 Licuefacción estática .....	76
7.2.1.3 Licuefacción de las zonas saturadas del depósito debido a solicitudes dinámicas .....	77
7.2.1.4 Deslizamiento sobre la fundación .....	78
7.2.1.5 Sobrepasso, tubificación y erosión .....	80
7.2.1.6 Fallo de estructuras auxiliares.....	82
7.2.1.7 Subsidiencia .....	83
7.2.2 Cálculo de la peligrosidad física o geológica.....	84
<b>8. INTERPRETACIÓN EN CAMPO DE LAS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS Y PROCESOS DE FALLO EN PRESAS DE LODOS CERRADAS Y ABANDONADAS .....</b>	89
8.1 Caracterización de drenajes en el talud.....	91
8.2 Caracterización de chimeneas o drenajes verticales en el vaso, piezómetros, etc .....	93
8.3 Caracterización de sales y costras de hidróxidos de hierro.....	95
8.4 Procesos de fallo en presas .....	96
8.4.1 Rotura de la presa.....	96
8.4.2 Colapso del vaso .....	97
8.4.3 Hundimiento de vaso.....	100
8.5 Posición de la laguna de decantación.....	101
8.6 Surgencias y rezumes el talud de la presa.....	101
8.7 Sobrepasso .....	103
8.8 Saturación de los materiales constituyentes.....	104
<b>9. ANALÍTICAS DE CAMPO Y LABORATORIO .....</b>	105
9.1 Analíticas para la determinación de la composición química.....	105
9.1.1 Calidad de las aguas superficiales, sobrenadantes, lixiviados, surgencias, etc .....	105
9.1.2 Composición en masa de los sedimentos de las estructuras mineras .....	105
9.1.3 Ensayos de lixiviación .....	106
9.1.3.1 Ensayo de Lixiviación en Campo .....	106
9.1.3.2 Ensayo de lixiviación de laboratorio .....	108
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	109

## 2<sup>a</sup> PARTE

<b>DISEÑO DE FICHAS PARA UN INVENTARIO DE RESIDUOS DE INSTALACIONES DE INDUSTRIAS EXTRACTIVAS .....</b>	113
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	115
<b>2. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO DE FICHAS DE ESCOBRERAS .....</b>	115
<b>3. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO DE FICHAS DE PILAS Y VERTEDEROS DE LIXIVIACIÓN ...</b>	122
<b>4. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO DE FICHAS DE PRESAS DE RESIDUOS .....</b>	129
<b>ANEXOS.....</b>	141

## ÍNDICE DE FIGURAS

*Págs.*

Figura 1.	Tipología de escombreras según emplazamiento.....	24
Figura 2.	Tipologías constructivas de escombreras.....	25
Figura 3.	Presa de tierras .....	30
Figura 4.	Presa de lodos aguas arriba (Upstream tailings dam) .....	31
Figura 5.	Presa de lodos aguas abajo (Downstream tailings dam) .....	32
Figura 6.	Presa centrada (Centerline tailings dam).....	33
Figura 7.	Tipología de presas según su ubicación .....	33
Figura 8.	Descarga de lodos espesada .....	34
Figura 9.	Vertido en cola.....	34
Figura 10.	Vertido en dique .....	34
Figura 11.	Sistema de drenaje mediante chimenea.....	35
Figura 12.	Drenaje mediante sifón hidráulico .....	36
Figura 13.	Granulometrías de suelos licuefactables .....	38
Figura 14.	Formación de aguas ácidas de mina.....	39
Figura 15.	Relación entre los potenciales de neutralización y acidez de residuos mineros ....	41
Figura 16.	Clasificación de aguas de mina .....	47
Figura 17.	Simplificación de filtración paralela.....	50
Figura 18.	Tipología de deslizamientos circulares .....	51
Figura 19.	Principales causas de inestabilidad de escombreras.....	53
Figura 20.	Distribución del tamaño de partícula de escombreras de carbón y carbón de coke susceptibles de haber sufrido licuefacción estática.....	54
Figura 21.	Relación entre el grado de saturación y la permeabilidad.....	62
Figura 22.	Curva granulométrica de una pila de lixiviado por cianuro.....	63
Figura 23.	Parámetros de estabilidad del cianuro libre .....	67
Figura 24.	Modelo conceptual de funcionamiento hidráulico de una presa de residuos con las diferentes vías de entrada y salida del agua .....	71
Figura 25.	Número de incidentes versus principales mecanismos de fallos de los diferentes tipos de presas de lodos de flotación de acuerdo al sistema de cierre utilizado en la construcción del dique.....	73
Figura 26.	Inestabilidad del talud de una presa de lodos por aproximación del nivel freático .....	76
Figura 27.	Curvas granulométricas de varias presas de lodos de flotación de minería de Pb-Zn..	77
Figura 28.	Ensayo de corte directo drenado con aplicación de una deformación de corte cíclica.	78

Figura 29.	Presa de Aznalcóllar, perfil transversal en la sección deslizada a) Sección vertical por la presa y la fundación. Superficie de deslizamiento detectada con sondeos. b) Detalle: etapas de construcción, mecanismo de rotura progresiva y piezometría..	79
Figura 30.	Complejo de Stava. a) Esquema de la reparación realizada para salvar de conducto de decantación obstruido en la presa superior (fuera de escala). b) Detalle .....	82
Figura 31.	Corona de una presa de lodos de arenas ciclonadas.....	89

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

*Págs.*

Fotografía 1. Conjunto de escombreras de minería metálica de Cobre .....	24
Fotografía 2. Pila de lixiviación con piscina de recogida del lixiviado (Perú).....	26
Fotografía 3. Instalación de geomembrana en un pila de lixiviados (Heap leaching).....	27
Fotografía 4. Descarga de lodos de flotación en una presa de residuos. Relleno hidráulico de la presa con vertido puntual .....	29
Fotografía 5. Dique construido por el sistema arcaico .....	32
Fotografía 6. Formación de AMD y precipitados de hierro en corta de carbón .....	42
Fotografía 7. Precipitados y coloides de oxihidroxisulfatos de aluminio en una arroyo a pH 4,6 – 5	43
Fotografía 8. Formación de sales evaporíticas en escombreras de finos de lavadero de carbón.	43
Fotografía 9. Autocombustión de una escombrera de carbón .....	44
Fotografía 10. Liquefacción estática en forma de flujo de una pila de lixiviación de oro .....	62
Fotografía 11. Deslizamientos superficiales en talud de presas de lodos .....	75
Fotografía 12. Deslizamiento profundo en dique, posiblemente por tubificación o piping consecuencia del colapso de la chimenea .....	75
Fotografía 13. Tubificación en dique .....	80
Fotografía 14. Formación de cárcavas con erosión remontante .....	81
Fotografía 15. Colapso del vaso de la presa por fallo en la chimenea de la presa.....	83
Fotografía 16. Dique realizado con los lodos de flotación por el sistema de tabla-estacas .....	90
Fotografía 17. Parte superior del dique a la misma altura que los lodos del vaso. Dique de lodos sin ciclonado de arenas.....	90
Fotografía 18. Tubería de drenaje de la presa roto y colmatado de lodos .....	91
Fotografía 19. Galería de drenaje de fondo no funcional con presencia de sales.....	92
Fotografía 20. Dique con drenes californianos no funcionales para drenar el talud .....	93
Fotografía 21. Chimenea en funcionamiento.....	94
Fotografía 22. Salida de una tubería en el pie del talud de una presa en funcionamiento, conectada con la chimenea del vaso.....	94
Fotografía 23. Formación de sales solubles el talud.....	95
Fotografía 24. Formaciones de costras de hidróxidos de hierro en el talud .....	96
Fotografía 25. Colapso de la presa de lodos denominada Luciana (Torrelavega) .....	97
Fotografía 26. Diques de arena típicos de procesos de liquefacción recorriendo la cabecera del deslizamiento .....	98
Fotografía 27. Colapso del vaso de una presa por piping debido a la rotura de la chimenea.....	99
Fotografía 28. Formación de grietas de tracción y diques de arena por colapso del vaso.....	99

Fotografía 29.Hundimiento del vaso de una presa restaurada con geotextil y gramíneas próxima al arroyo de la Campana en La Carolina.....	100
Fotografía 30.La tubería de drenaje del fondo de la presa anterior se encuentra deformada, por lo que el hundimiento puede estar relacionado con el fallo de este sistema de drenaje .....	100
Fotografía 31.Laguna de decantación en presa de aguas ácidas.....	101
Fotografía 32.Rezumes en dique de lodos .....	102
Fotografía 33.Surgencia entre la base de la presa y el cimiento (Areniscas del Buntsandstein)..	102
Fotografía 34.Cárcava producida por la apertura de una zanja para desaguar el agua del vaso de la presa .....	103
Fotografía 35.Toma de una muestra de lodos saturados con barrena de mano a una profundidad aproximada de un metro.....	104