

JUNTA DE ANDALUCÍA

CONSEJERÍA DE EMPLEO Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
Dirección General de Industria, Energía y Minas

GUÍA PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESCOMBRERAS

La presente Guía ha sido elaborada por el siguiente equipo técnico.

Por la **Junta de Andalucía**

- Manuel J. DONAIRE MARQUEZ
Ing. de Minas
Jefe del Servicio de Minas

Por la **E.T.S. de Ingenieros de Minas de Madrid**

- Carlos LÓPEZ JIMENO
Dr. Ing. de Minas
Catedrático de Proyectos de Ingeniería.
- Osvaldo ADUVIRE PATACA
Dr. Ing. de Minas
- Pilar GARCÍA BERMÚDEZ
Dra. Ing. de Minas
- Ivan VAQUERO DIAZ
Ing. de Minas

En la preparación de originales y maquetación, también, han participado Hugo Aduvire Pataca y Elisabet Arias Ripoll.

Índice

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN

1.1. DEFINICIONES GENERALES	1-1
1.2. TIPOLOGÍA Y DESCRIPCIÓN DE LAS ESCOMBRERAS	1-2
1.3. PROYECTO CONSTRUCTIVO	1-4
1.3.1. Memoria	1-5
1.3.2. Planos	1-8
1.3.3. Cálculos de estabilidad	1-8
1.3.4. Anexos	1-9
1.4. MANTENIMIENTO Y CONTROL DE LA ESCOMBRERA	1-14
1.5. PROYECTO DE ABANDONO	1-15

Capítulo 2: TIPOS DE ESTÉRILES MINEROS Y SUS PROPIEDADES

2.1. INTRODUCCIÓN	2-1
2.2. CLASES DE ESTÉRILES MINEROS	2-1
2.3. GRANULOMETRÍA	2-3
2.4. PLASTICIDAD DE LOS FINOS	2-6
2.5. RESISTENCIA INTACTA	2-6
2.6. RESISTENCIA AL CORTE	2-7
2.7. MINERALOGÍA Y PETROGRAFÍA	2-14
2.8. DURABILIDAD	2-14
2.9. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	2-15
2.10. CONSOLIDACIÓN Y ASENTAMIENTO	2-17
2.11. CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS	2-17

2.12. METODOLOGÍA DE REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS	2-19
2.13. RELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS DE LOS ESTÉRILES	2-22
2.14. HIDROESTRATIGRAFÍA DE ESCOMBRERAS	2-25

Capítulo 3: ELECCIÓN Y PREPARACIÓN DEL EMPLAZAMIENTO

3.1. INTRODUCCIÓN	3-1
3.2. LUGAR DE EMPLAZAMIENTO	3-1
3.3. TAMAÑO Y FORMA. CLASIFICACIÓN DE ESCOMBRERAS	3-3
3.4. GEOLOGÍA Y CAPACIDAD PORTANTE	3-5
3.5. METODOLOGÍA PARA LA ELECCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO	3-5
3.5.1. Método del Índice de Calidad	3-6
3.5.2. Método de las Funciones de Utilidad	3-8
3.6. ESTUDIO DEL EMPLAZAMIENTO	3-14
3.6.1. Terrenos del cimiento	3-14
3.6.2. Descripción	3-16
3.6.3. Propiedades y clasificación	3-16
3.6.4. Conductividad hidráulica	3-16
3.6.5. Consolidación	3-17
3.6.6. Resistencia	3-17
3.6.7. Mineralogía y química del suelo	3-18
3.6.8. Densidad <i>in situ</i>	3-20
3.6.9. Compactación	3-21
3.7. SUSTRATO ROCOSO DEL CIMIENTO	3-21
3.7.1. Descripción	3-21
3.7.2. Resistencia	3-21
3.7.3. Mineralogía y petrografía	3-22
3.7.4. Durabilidad	3-23
3.7.5. Conductividad hidráulica	3-23
3.8. RECUBRIMIENTO	3-23
3.8.1. Descripción, propiedades y clasificación	3-23
3.8.2. Conductividad hidráulica	3-25
3.8.3. Resistencia al corte	3-25
3.8.4. Densidad	3-25

Índice

3.8.5. Mineralogía y química	3-25
3.9. CALIDAD DEL AGUA	3-25

Capítulo 4: CONSTRUCCIÓN DE ESCOMBRERAS

4.1. INTRODUCCIÓN	4-1
4.2. PREPARACIÓN DEL CIMIENTO Y SISTEMAS DE DRENAJE	4-1
4.2.1. Preparación del cimientto	4-1
4.2.2. Drenaje	4-2
4.3. CONTROL DE LA CALIDAD DE LOS MATERIALES	4-7
4.3.1. Degradación de la calidad de los materiales	4-9
4.3.2. Comprobación de las propiedades de los materiales	4-10
4.4. OPERACIONES DE VERTIDO	4-12
4.4.1. Procedimientos de vertido	4-12
4.4.2. Áreas de vertido alternativas	4-17
4.4.3. Ritmos de descarga	4-17
4.4.4. Control de la nieve	4-18
4.5. MÉTODOS Y SISTEMAS CONSTRUCTIVOS	4-19
4.5.1. Construcción de escombreras con apiladores	4-29
4.6. ESCOMBRERAS DE CONSTRUCCIÓN SELECTIVA PARA PREVENIR LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS	4-31
4.6.1. Aspectos generales	4-31
4.6.2. Medidas de control de aguas ácidas en escombreras	4-32

Capítulo 5: ESCOMBRERAS DE ESTÉRILES CARBONOSOS

5.1. INTRODUCCIÓN	5-1
5.2. ORIGEN DE LA COMBUSTIÓN DE ESTÉRILES DE CARBÓN Y RIESGOS QUE IMPLICA ...	5-3
5.2.1. Factores implicados	5-3
5.2.2. Ignición espontánea	5-3
5.2.3. Ignición accidental	5-5
5.2.4. Riesgos intrínsecos de las escombreras en combustión	5-6

5.3. EVALUACIÓN DEL RIESGO DE COMBUSTIÓN ESPONTÁNEA	5-12
5.3.1. Poder calorífico (PC)	5-12
5.3.2. Pérdida en peso durante la combustión	5-13
5.3.3. Potencial de combustión	5-13
5.3.4. Cambio en las condiciones de la zona de vertido	5-13
5.3.5. Temperatura	5-13
5.3.6. Indicadores de superficie	5-15
5.3.7. Modelo del proceso de autocombustión de depósitos de estériles de carbón	5-16
5.4. MÉTODOS DE TRATAMIENTO DE ESCOMBRERAS DE ESTÉRILES DE CARBÓN	5-20
5.4.1. Factores determinantes del método de tratamiento	5-20
5.4.2. Excavación y remoción de los estériles en combustión	5-21
5.4.3. Atrincheramiento de las áreas en combustión	5-23
5.4.4. Recubrimiento de la superficie de la escombrera	5-24
5.4.5. Inyecciones en profundidad	5-25
5.4.6. Compactación superficial	5-26
5.4.7. Inundación	5-26
5.4.8. Ausencia de actuaciones	5-26
5.4.9. Inyecciones criogénicas	5-26
5.5. CRITERIOS PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESCOMBRERAS DE ESTÉRILES DE CARBÓN CON RIESGO DE IGNICIÓN	5-27
5.5.1. Emplazamiento	5-27
5.5.2. Preparación del terreno	5-27
5.5.3. Sistema de vertido	5-28

Capítulo 6: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE ESCOMBRERAS

6.1. INTRODUCCIÓN	6-1
6.2. FACTORES QUE AFECTAN A LA ESTABILIDAD	6-1
6.3. CLASIFICACIÓN DEL GRADO DE ESTABILIDAD DE LAS ESCOMBRERAS. INDICE INESTEC	6-3
6.4.1. Seguridad de personas y equipos	6-9
6.4.2. Riesgo en instalaciones	6-10
6.4.3. Riesgo medioambiental	6-10
6.5. TIPOS DE ROTURA DE ESCOMBRERAS	6-10
6.5.1. Rotura de borde	6-15
6.5.2. Rotura planar	6-15
6.5.3. Rotura rotacional	6-15
6.5.4. Rotura en flujo	6-15

Índice

6.6. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD	6-16
6.6.1. Análisis de estabilidad de roturas circulares mediante gráficos	6-17
6.6.1.1. Gráficos de Taylor	6-20
6.6.1.2. Gráficos de Bishop y Morgenstern	6-26
6.6.1.3. Gráficos de Spencer	6-26
6.6.1.4. Gráficos de Janbu	6-29
6.6.1.5. Gráficos de Hoek y Bray	6-29
6.6.1.6. Gráficos de Huang	6-31
6.6.1.7. Gráficos de Cousins	6-35
6.6.2. Método del equilibrio límite (M.E.L.)	6-38
6.6.2.1. Método de Fellenius	6-41
6.6.2.2. Método de Bishop simplificado	6-42
6.6.2.3. Método de Janbu	6-43
6.6.2.4. Método de Bishop completo	6-44
6.6.2.5. Método de Spencer	6-44
6.6.2.6. Método de Morgenstern-Price	6-46
6.6.2.7. Análisis de estabilidad de roturas planares: método de las cuñas	6-46
6.6.3. Método de elementos finitos (M.E.F.)	6-54
6.6.4. Métodos tridimensionales	6-55
6.6.5. Cálculo dinámico	6-57
6.7. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD	6-73

Capítulo 7: AUSCULTACIÓN DE ESCOMBRERAS

7.1. INTRODUCCIÓN	7-1
7.2. SIGNIFICADO DE LA AUSCULTACIÓN	7-2
7.3. INSPECCIONES VISUALES	7-4
7.3.1. Cresta de la escombrera	7-5
7.3.2. Talud de la escombrera	7-5
7.3.3. Cimentación de la escombrera	7-6
7.3.4. Auscultación acústica	7-6
7.4. MÉTODO OBSERVACIONAL	7-6
7.5. APLICABILIDAD DE LOS MÉTODOS DE AUSCULTACIÓN	7-7
7.6. TIPOS DE ROTURA	7-8
7.7. PROBLEMAS HABITUALES EN LA AUSCULTACIÓN DE ESCOMBRERAS	7-12
7.8. SELECCIÓN DE LOS MÉTODOS DE AUSCULTACIÓN	7-13

7.8.1. Introducción	7-13
7.8.2. Requisitos generales	7-14
7.8.3. Elección de la auscultación con relación a la clasificación de escombreras	7-14
7.9. TECNOLOGÍA APLICABLE A LA AUSCULTACIÓN DE ESCOMBRERAS	7-18
7.9.1. Elección de la instrumentación según las necesidades de auscultación	7-18
7.9.2. Perforación	7-18
7.9.3. Movimientos	7-19
7.9.3.1. Extensómetros de cables	7-19
7.9.3.2. Extensómetros enterrados	7-22
7.9.3.3. Inclínómetros	7-22
7.9.3.4. Levantamiento topográfico	7-22
7.9.4. Presiones intersticiales del agua	7-23
7.9.4.1. Piezómetros neumáticos	7-24
7.9.4.2. Piezómetros de resistencia eléctrica	7-24
7.9.4.3. Piezómetros eléctricos de cuerda vibrante	7-27
7.9.4.4. Piezómetros <i>standpipe</i>	7-27
7.9.4.5. Piezómetros múltiples	7-27
7.9.5. Células de carga	7-27
7.9.6. Auscultación visual	7-28
7.9.7. Otras técnicas	7-28
7.9.7.1. Auscultación por emisión acústica (EA)	7-28
7.9.7.2. Auscultación por emisión electromagnética	7-29
7.9.7.3. Videometría	7-30
7.9.7.4. Cámaras láser	7-31
7.9.7.5. Termografías	7-31
7.9.7.6. Muestreo de los estériles vertidos	7-32
7.10. REGISTRO, TRANSMISIÓN Y SIMPLIFICACIÓN DE DATOS	7-32
7.10.1. Equipos de adquisición de datos	7-32
7.10.2. Equipos de transmisión de datos	7-33
7.10.2.1. Unidad terminal remota (UTR) y sensores	7-33
7.10.2.2. La interfaz de telemetría	7-34
7.10.3. Reducción de los datos	7-35
7.11. EVALUACIÓN DE LOS DATOS	7-36
7.12. REQUERIMIENTOS DE INFORMES	7-36
7.13. LECTURA DE LOS INSTRUMENTOS. ACTUACIONES NECESARIAS	7-38
7.14. REQUERIMIENTOS PARA EL CIERRE Y REAPERTURA	7-38
7.14.1. Restricción del acceso	7-38
7.14.2. Reapertura de las escombreras después de su cierre	7-39
7.15. AUSCULTACIÓN, INSPECCIÓN Y ARCHIVO DE LA INFORMACIÓN	7-40
7.15.1. Clasificación de las escombreras mineras	7-40

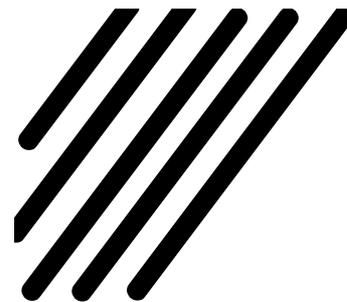
Índice

7.15.2.	Recopilación de la información recogida	7-40
7.15.3.	Requerimientos en la auscultación	7-41
7.15.4.	Inspección de escombreras	7-41
7.15.5.	Elaboración de informes	7-48
7.16.	INFORME DE ROTURA DE ESCOMBRERA Y ANÁLISIS RETROSPECTIVO	7-48
7.16.1.	Introducción	7-48
7.16.2.	Informe de la rotura	7-48

GLOSARIO

BIBLIOGRAFÍA

capítulo 1



INTRODUCCIÓN

1.1. DEFINICIONES GENERALES

Se denomina escombrera a toda aquella acumulación de materiales sólidos de granulometría variable procedentes de las actividades humanas, bien como residuos de los procesos mineros (estériles rocosos) o de otros procesos industriales o urbanos (escombros de derribo, tierras de vaciado de solares, etc.), Fig 1.1. En minería, estos estériles se originan por excavación de galerías de preparación de labores en rocas encajantes, por los desmontes de las rocas de recubrimiento en las explotaciones a cielo abierto, por separación o estrío a partir del mineral, como residuos compactados de procesos de lavado o mejora de la calidad de la producción de minerales y productos industriales, o como residuos de cualquier otro tipo u origen. La acumulación de estos residuos debe realizarse, fundamentalmente, por la carencia de valor económico o la imposibilidad de su aprovechamiento en el momento de su almacenamiento, o bien por la necesidad de mantenerlos controlados dadas sus características.

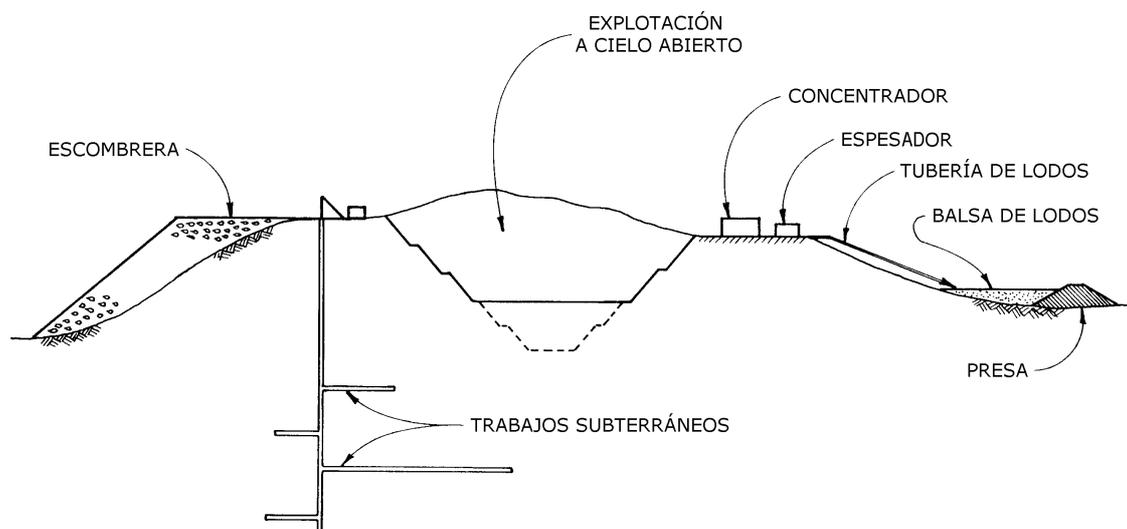


Figura 1.1. Labores mineras que originan estériles y sistemas de deposición (CANMET, 1979).

Introducción

En el vertido o deposición se desaconseja la mezcla en una misma escombrera de estériles de tamaños y naturaleza diversa y la ocasional de lodos sobre los escombros, ya que pueden dar lugar a estructuras mixtas de difícil control y dudosa estabilidad.

Tradicionalmente, la forma de implantar las escombreras se ha realizado buscando la facilidad de transporte y ocupación de terrenos sin un plan previo de desarrollo. Aunque, en líneas generales, este proceder ha dado resultados aceptables, en algunos casos se han producido accidentes importantes y en otros un impacto ambiental excesivo, lo que hace aconsejable disponer de unas normas de buena práctica y unos criterios de ejecución y control para futuras implantaciones.

En los siguientes apartados se hace una síntesis del contenido que deben tener los proyectos de nuevas escombreras, de acuerdo con la legislación vigente.

1.2. TIPOLOGÍA Y DESCRIPCIÓN DE LAS ESCOMBRERAS

Los depósitos de estériles se pueden describir atendiendo, normalmente, a los siguientes criterios:

1. *Por sus dimensiones*

Se considera escombrera cualquier acumulación de materiales que sobrepase los 25 000 m³ de volumen, los 15 m de diferencia de altura entre su pie y la parte superior del depósito, o bien cuyo espesor de estéril sea superior a 10 m. En condiciones normales de homogeneidad y humedad del material, se dividen en:

- S *Grandes*. Aquellas cuya altura sea superior a 30 m.
- S *Medianas*. Aquellas cuya altura sea superior a 20 m e inferior a 30 m.
- S *Pequeñas*. Aquellas cuya altura sea superior a 15 m e inferior a 20 m.

2. *Por su emplazamiento*

Se dividen en:

- S *De vaguada, fondo de valle o cauce*.
- S *De ladera*. Situadas sobre pendientes con inclinaciones de hasta el 8 %.
- S *De divisoria*.
- S *En llanura o exenta*.
- S *De relleno de corta o hueco minero*.

3. *Por el tipo o sistema de vertido*

Se dividen en:

- S *De vertido libre o por gravedad*. En general, no reglamentario, excepto en el caso de escombreras de pequeñas dimensiones o en el interior de minas activas siempre y cuando no exista riesgo de deslizamiento o inestabilidad.
- S *De vertido libre por fases adosadas*. Método más recomendable debido a su mayor estabilidad.
- S *Escombreras con dique de retención en pie o tacón de escollera*. Recomendable cuando los estériles a verter presentan diferentes litologías.

- S *De vertido por fases ascendentes retranqueadas y superpuestas.* Implican tongadas horizontales compactadas.
- S *Estructuras mixtas.* Aquellas que combinan algunos de los métodos anteriores.

4. *Por el método constructivo*

Se dividen en:

- S *Por basculamiento final.* Da lugar a franjas de material inclinadas de acuerdo con el ángulo de rozamiento interno del mismo.
- S *Por tongadas horizontales compactadas.* Método más general y recomendable debido a su mayor estabilidad.



Foto 1.1. Escombrera de vaguada.

5. *Por su grado de riesgo potencial, estabilidad y coeficiente de seguridad*

Debido a su posible deslizamiento, se dividen en:

S *Clasificación por riesgo (Tipo A):*

Escombreras Tipo AI. Sin riesgos para personas, bienes, etc.

Escombreras Tipo AII. Presentan riesgo moderado para personas, bienes, etc.

Escombreras Tipo AIII. Presentan un riesgo elevado para personas, bienes, etc.

Introducción

S Clasificación por seguridad ligada a la presencia de agua y problemas del cimiento (Tipo B):

Escombreras normales (Tipo BI). Sin efecto de aguas freáticas y en cuya estabilidad no interviene el cimiento.

Escombreras sometidas a filtración (Tipo BII). Agua en grietas o fisuras y riesgo de deslizamiento por la cimentación.

Escombreras en situación de inundación, inestabilidad por riesgo sísmico, etc. (Tipo BIII).

1.3. PROYECTO CONSTRUCTIVO

Se entiende por proyecto el conjunto de todos los estudios y recopilación de datos preliminares necesarios para justificar el emplazamiento del depósito, las características del mismo y de los materiales a verter así como la relación del depósito con su entorno natural, los datos y estudios relativos a su estabilidad, las medidas de control a desarrollar y el mantenimiento a realizar para la buena conservación del depósito y, en su caso, las medidas a implementar cuando finalice su vida activa a efectos de abandono definitivo.

También se incluirán como parte del proyecto constructivo una descripción detallada de las medidas de seguridad previstas tanto para garantizar la estabilidad del depósito como la seguridad de las personas y bienes.

Todo proyecto será dirigido y firmado por un técnico titulado competente y será presentado por el promotor a la Autoridad Minera para su aprobación previo estudio, quien podrá exigir aclaraciones al proyecto y prescribir la realización de nuevos estudios y planos complementarios.

Así mismo, todos los estudios técnicos, ensayos, análisis, etc., que se adjunten al proyecto de escombrera deberán ser desarrollados por técnicos competentes y firmados por los mismos sin perjuicio de que el técnico responsable del proyecto los hace suyos al incluirlos en el proyecto presentado.

Todo proyecto estará formado por las siguientes partes:

- Memoria descriptiva.
- Planos.
- Cálculos justificativos.
- Anexos, que recojan los estudios realizados y datos obtenidos:
 - Geología y geotecnia del sustrato.
 - Estudios geotécnicos y de estabilidad del depósito.
 - Estudio hidrogeológico.
 - Estudios climatológicos.
 - Estudio de subsidencia.
 - Estudio sismorresistente.
 - Materiales de vertido. Propiedades y características geotécnicas.
 - Sistema y ritmo de vertido.
 - Medidas de seguridad y control.
 - Estudio de impacto ambiental.
 - Plan de restauración.

1.3.1. Memoria

El proyecto de construcción de la escombrera tendrá en consideración los siguientes criterios de selección:

1. Técnicos:

- S Zona no mineralizada.
- S Diferencias de cotas topográficas que indiquen la capacidad de vertido.
- S Cerrada, sin cauces de agua.
- S Pendientes suaves y terrenos estables.
- S Características de suelo, subsuelo y roca firme.
- S Características hidrogeológicas.

2. Económicos:

- S Terrenos de poco valor.
- S Distancia mínima a la explotación.
- S Posibilidad de empleo del material.

3. Sociales:

- S No proximidad a zonas habitadas.
- S Posibilidad de recuperación y restauración.

4. Ecológicos:

- S Relleno de huecos.
- S Conservación de la tierra vegetal.
- S Integración paisajística en el entorno natural.

Dicho proyecto constructivo de una nueva escombrera atenderá siempre a los siguientes factores generales:

- S Aprovechamiento máximo de los volúmenes disponibles y simplicidad de los métodos de vertido.
- S Utilización racional de los medios de transporte y de la maquinaria pesada.
- S Proyecto constructivo que favorezca la restauración, revegetación e integración en el entorno.
- S Establecimiento de una buena red de drenaje de fondo y desagüe general.
- S Distribución adecuada de los productos a verter.
- S Obtención de condiciones de estabilidad satisfactorias.
- S Máxima disminución posible del impacto ambiental y la contaminación (polvo, aguas, ruidos, etc.).
- S Preparación de un plan de mantenimiento y control.
- S Seguridad en el trabajo. La instalación se proyectará con las debidas condiciones de seguridad tanto de las personas como de los bienes materiales y tanto en la ejecución como durante las fase de mantenimiento.

El proyecto constructivo deberá definir el tipo de escombrera que se pretende ejecutar atendiendo a diversos aspectos de interés y de acuerdo con las definiciones y tipologías de escombreras definidas anteriormente. En cualquier caso, se deben recoger perfectamente los siguientes aspectos:

Introducción

1. Volumen y tonelaje de material a verter. Necesidades y previsiones de vertido.
2. Tipos de materiales a verter, caracterizados correctamente desde el punto de vista físico, químico y/o mecánico, así como el porcentaje de cada tipo de material vertido.
3. Situación de la escombrera. Para cualquier situación se desarrollará el concepto de caras libres de la escombrera (números de caras libres, posición, características geométricas, etc.) y las medidas de seguridad de las mismas.
4. Sistemas de vertido a emplear, en cuanto a su espesor, método de compactación, disposición y métodos de lucha contra el polvo y ruidos.
5. Materiales sobre los que se asienta.
6. Función del depósito. Se definirá perfectamente el objetivo del depósito, señalando si las escombreras son definitivas o temporales, y exteriores en el caso de cielo abierto.
7. Posibles problemas de erosión por corrientes de agua superficial.

En la memoria del proyecto se hará una descripción detallada del emplazamiento previsto para la escombrera indicando una serie de datos de partida. Se incluirá una situación geográfica reflejada en planos a escala entre 1:500 y 1:2 000, incluyendo los siguientes datos:

- S La superficie prevista a ocupar y características topográficas del conjunto.
- S La superficie de la zona de afección de la obra.
- S Descripción de la red hidrográfica afectada por la construcción y de la modificación de dicha red.
- S Situación de la escombrera respecto a actividades mineras activas o paradas.
- S Situación y relación con núcleos de población, infraestructuras y bienes protegibles, túneles, etc.

En el caso de aprovechar antiguos huecos mineros, se justificará la totalidad de las obras proyectadas, analizando los métodos utilizados, ritmo y duración del vertido, método de creación y limpieza del hueco, taludes originales, sistema de drenaje perimetral, interior y de fondo, en planos a escala mínima de 1:1 000. También se definirán el número y las dimensiones de los bancos, así como de los accesos y rampas en planos a la misma escala.

Cuando se deba acondicionar el hueco, se definirá el método de trabajo y de arranque (mecánico y/o voladura), detallando la voladura y los sistemas de carga y transporte. Por último, se definirán y ubicarán las oficinas y talleres auxiliares, así como los talleres de mantenimiento de maquinaria.

En general, dentro del proyecto constructivo se especificarán, en planos a escala entre 1:500 y 1:2 000, los siguientes aspectos:

1. Limpieza de materiales sueltos en fondo y taludes laterales.
2. Retirada y apilado de materiales de cobertera, caracterizándolos y definiendo el tratamiento corrector durante el apilado (corrección de pH, nitratos, siembra de especies nitrificantes, etc.)

3. Captación de puntos de agua, enumerando los manantiales a captar y el sistema de canalización.
4. Construcción de la red de drenaje de fondo, definiendo las secciones, pendiente y distribución de conductos y su revestimiento (geotextil, plástico, etc.) para su impermeabilización.
5. Construcción de la red de drenaje perimetral y de bancos temporales y finales, definiendo:
 - S El diseño de canalizaciones interiores y exteriores.
 - S La estimación del nivel freático en la masa de escombros.
 - S Las secciones, pendientes y distribución de los conductos.
 - S Las mesetas superiores de los bancos y de las bermas temporales y finales.
 - S La situación y descripción de la balsa de decantación
6. Diseño de pistas de servicio y bermas de trabajo, estableciendo la secuencia de llenado y las características de los bancos en fase de trabajo (altura, inclinación del talud, anchura, etc.)
7. Método de transporte, vertido y compactación.
8. Perfilado de taludes y formación de bermas definitivas, definiendo las características finales de los bancos (altura, anchura, ángulo medio final, etc.), sistemas de cunetas de talud y pendientes de las mesetas de los bancos.



Foto 1.2. Escombrera construida mediante vertido directo.

9. Medidas pasivas de control de estabilidad. Estas medidas deberán mantenerse durante las fases de cierre, mantenimiento y control de la escombrera, y son las siguientes:

Introducción

- S Ensayos de compactación.
 - S Levantamientos topográficos.
 - S Inclínómetros, extensómetros, piezómetros, etc.
 - S Medidas de contención y drenaje previstas para el refuerzo del paramento exterior.
 - S Características del pie de la escombrera.
 - S Descripción de pedraplenes y escolleras.
10. Programa de restauración. Durante la elaboración del proyecto constructivo se elaborará un programa de restauración, que incluirá un E.I.A., con vistas a toda la vida útil de la escombrera y que cumpla los siguientes objetivos:
- S Mejorar su integración paisajística y su estabilidad general.
 - S Controlar la evacuación de líquidos de lixiviación contaminantes.
 - S Integrar el espacio restaurado a otras actividades de tipo económico, paisajístico, deportivo, etc.
 - S Cuando se contemple la cubrición con tierras y revegetación se tendrá en cuenta la composición del suelo, la forma y secuencia de extensión de los materiales de cubrición, los métodos de siembra, elección de la vegetación y los métodos contra la erosión.

1.3.2. Planos

Los planos del proyecto se realizarán a escala y forma tal que permitan definir los detalles de las obras y las características del área en el que se va a ubicar el depósito, así como su entorno.

Todos los planos utilizados tendrán referencias a las cartografías nacionales oficiales editadas por el I.G.N. e incluirán las coordenadas oficiales U.T.M. para conseguir una adecuada situación espacial de la zona.

Se considerarán adecuadas las escalas 1:25 000 o 1:10 000 en lo relativo a situación general y marco geográfico, 1:5 000 o 1:2 000 en lo relativo a planos del perímetro afectado y de las instalaciones, y 1:500 o 1:1 000 en lo relativo a todos los estudios técnicos para la obra. A estos efectos, se considera perteneciente a la zona perimetral al menos 500 m alrededor de la escombrera.

Deberán plasmarse en planos taquimétricos a escala 1:500 las zonas donde se pretenda trabajar para la realización de la escombrera en un período mínimo de 5 años, además de disponer de un sistema de perfiles que permitan conocer el alzado del terreno original y de las sucesivas fases de excavación y vertido durante la vida de la instalación. Este sistema de perfiles, realizado a escala 1:100 o 1:500, deberá ser situado en el campo con hitos permanentes y se compondrá de, al menos, un perfil cada 25 m medidos perpendicularmente al eje de la escombrera y paralelos a él.

1.3.3. Cálculos de estabilidad

Los proyectos de escombreras deberán ir acompañados por los cálculos de estabilidad más adecuados en cada caso, empleando los métodos que se consideren más adecuados y que serán debidamente justificados por el proyectista.

Se definirán las escombreras por su grado de estabilidad, coeficiente de seguridad y riesgo potencial, y se justificarán los cálculos de estabilidad con los coeficientes de seguridad establecidos en el Capítulo 6, que se comentará más adelante.

1.3.4. Anexos

El proyecto irá acompañado del conjunto de anexos que se describen a continuación. Su amplitud y alcance dependerá de la problemática estudiada y de su importancia e incidencia en la solución propuesta. En conjunto, todos estos estudios servirán para definir la geometría del depósito, su estabilidad, su impacto ambiental e influencia en el entorno, etc.

A. Geología y geotecnia del sustrato

Se realizará un estudio detallado del emplazamiento del depósito de estériles y de toda su zona de influencia incluyendo tanto el sustrato de fondo como los taludes rocosos laterales. Se incluirán cartografías de superficie así como otras obtenidas por medios geofísicos o mecánicos que permitan definir con exactitud todos los aspectos geológicos. El estudio incluirá:

- a) Descripción y cartografía geológica detallada de la zona de asentamiento y de influencia del depósito, definiendo las características litológicas de los terrenos existentes así como sus variaciones laterales. Planos a 1:500 a 1:2 000.
- b) Cartografía, distribución y composición de los terrenos de alteración superficial. Planos a 1:500 a 1:2 000.
- c) Realización de campañas geofísicas, si éstas son necesarias, que permitan conocer la distribución y espesor de materiales alterados, zonas húmedas, acuíferos, etc.
- d) Estudio estructural de detalle del macizo rocoso con indicación de los sistemas de fracturación existentes, penetratividad de los mismos, rellenos y alteración de los planos de fractura, posibilidad de circulación de aguas, etc. Planos a escala 1:500 a 1:2 000.
- e) Realización de campañas de sondeos, si éstas son necesarias, definiendo el número y tipo de sondeos, longitud y diámetro.
- f) Realización de los ensayos de laboratorio más indicados para el estudio de las muestras tomadas.

En lo posible se procurará que las obras de reconocimiento puedan ser incorporadas a la obra definitiva, sirviendo de elementos de control y vigilancia para registrar posibles anomalías en el comportamiento del terreno, en las filtraciones, niveles freáticos, etc.

B. Estudios geotécnicos y de estabilidad del depósito

Se justificará, mediante estudios geotécnicos, la estabilidad de los taludes del depósito, tanto los temporales en avance como los finales, y las soluciones constructivas a adoptar con bermas y plataformas.

Introducción

La importancia del estudio será función de los condicionantes geométricos y de la posible incidencia sobre instalaciones, infraestructuras, etc. Se justificará la estabilidad de las escombreras creadas tanto por la resistencia del cemento como por su propio diseño y ubicación.

En el estudio de la estabilidad y resistencia de la escombrera proyectada, la utilización del método de formación de la escombrera tiene importancia sobre la homogeneidad y estabilidad de la misma. En este sentido, se admitirá el vertido directo desde camión o desde cinta en escombreras de manto o de pequeña envergadura, y cuando no exista riesgo de daños al pie por rodadura de piedras

C. Estudio hidrogeológico y climatológico

Si existe agua en el macizo rocoso donde se va a instalar el depósito o en la propia escombrera, o bien ésta se ubique en la proximidad de un curso de agua permanente o pueda dar lugar a zonas de recepción y almacenamiento importante de agua, se realizará un estudio hidrogeológico adecuado a cada caso que analice los problemas relativos a circulación de aguas, estimaciones de caudales de agua que puedan circular o deban ser evacuados, riesgo de contaminación de acuíferos, aportes de agua, presiones hidrostáticas, etc.

Es recomendable la realización de una modelización digital del terreno y análisis de cuencas vertientes que permitan conocer la incidencia de los grandes depósitos de estériles sobre la circulación regional de las aguas.

Como parte de estos estudios deberán recogerse datos históricos sobre la climatología de la zona o disponer de medios técnicos para la toma de los mismos. Estos datos deben resumirse en planos regionales, y en ellos se incluirá todo lo relativo a la pluviometría y termometría regional, los cálculos de evapotranspiración, infiltración, lluvia útil, nieve, régimen de vientos, etc.

D. Estudio de subsidencia

Aunque debe evitarse la implantación de escombreras sobre zonas de eventual explotación subterránea, o sobre aquellas que pueden verse afectadas por subsidencia, no siempre es posible, por lo que deben realizarse unos estudios que permitan conocer:

1. La cuantía total de la subsidencia tanto en hundimientos como en deformaciones. Planos a escala 1:500 a 1:1 000.
2. La relación de las escombreras de superficie con las labores subterráneas en activo y planificadas, y con los macizos de mineral explotados, en explotación o previstos. Planos a escala 1:500 a 1:1 000.
3. La malla de hitos topográficos para conocer la evolución de las subsidencias en aquellas zonas más sensibles.

E. Estudio sismorresistente

En aquellos casos en que las escombreras se sitúen en zonas de especial susceptibilidad sísmica, se

realizarán estudios sismorresistentes que permitan conocer la influencia de estos fenómenos en la estabilidad del depósito.

Si existen explotaciones mineras cerca de la escombrera, se estudiará la influencia que las vibraciones producidas por las voladuras pueden ejercer en su estabilidad.

En ambos casos se adjuntarán planos a escala regional sobre la sismicidad y planos de detalle sobre la influencia de las voladuras.

F. Materiales de vertido, propiedades y características geotécnicas

Se deberán describir los siguientes aspectos referidos a los materiales que van a ser vertidos:

S Características generales de los materiales de vertido:

- Procedencia.
- Volúmenes esperables y ritmo de vertido.
- Tipo de transporte previsto.
- Duración de la fase de vertido.

S Tipos de materiales. Descripción de los mismos, composición, litología, etc.

S Propiedades físico-químicas de cada tipo de material vertido:

- Porcentaje sobre el total de vertidos.
- Descripción desde el punto de vista de la seguridad.

S Propiedades del material necesarias para el cálculo de la estabilidad:

- Densidad aparente en el depósito.
- Estado de agregación.
- Granulometría y grado de compactación.
- Porcentaje de finos naturales obtenido por compactación o meteorización.
- Humedad inicial y final debido a permeabilidad y drenaje.
- Cohesión y ángulo de rozamiento.
- Alterabilidad.

Con el paso del tiempo, los materiales depositados en la escombrera sufren una degradación o reducción de tamaños por la acción mecánica, presiones, impactos, etc., de los procesos de transporte y vertido. Además, según la naturaleza de la roca, la acción de los agentes climáticos produce una meteorización que se traduce en transformaciones químicas, desintegración y fragmentación.

En lo que respecta a la degradación mecánica, juega un papel importante la resistencia de la roca, ya que las rocas blandas, friables o deleznales se disgregan rápidamente bajo las ruedas de los camiones y tractores de orugas. En el caso de bloques grandes bastan los impactos de vertido para que se formen

Introducción

trozos del orden de la cuarta parte del tamaño inicial. La intensidad de la degradación es menor en materiales graduados o cuando el porcentaje de finos es mayor del 25 %.

S Alteraciones químicas previsibles que puedan incidir negativamente en la estabilidad del depósito, que dañen su estructura o que produzcan lixiviados contaminantes:

- Grado de compactación.
- Sustancias alcalinas presentes.
- pH.
- Óxidos de hierro.
- Sulfatos cálcicos y sódicos que pueden afectar al hormigón.
- Parámetros químicos que pueden afectar a la revegetación, tales como oxidación, formación de ácidos, calor, humedad y superficie de contacto del material con el aire.

También se estudiarán las alteraciones químicas que influyan positivamente en la estabilidad, como la cristalización o la cementación.



Foto 1.3. Segregación de los estériles rocosos.

En el recrecimiento de escombreras, se estudiarán todas las circunstancias geotécnicas del material ya vertido que le sirva de base, sobre todo su compactación y grado de estabilidad. Por lo tanto, debe realizarse de la forma más homogénea posible, por capas horizontales no superiores a un metro o lo previsto en el posible

sistema de compactación. Debe evitarse adosar estériles a montones o plataformas mucho más altas, ya que puede dar lugar a zonas flojas.

Los escombros finos, plásticos, estériles de lavadero o recubrimientos arcillosos deben depositarse en zonas encajadas, de estabilidad asegurada o en las partes más retranqueadas de la escombrera, a distancias no inferiores al 70 % de la altura. Debe procurarse no crear bolsas blandas de más de 3 m de espesor en una misma vertical, repartiendo los estériles de la forma más discontinua posible en el seno de la escombrera.

Si entre los escombros apareciesen esporádicamente elementos finos o arcillosos, se evitará verterlos en vaguadas o zonas deprimidas, ya que, al cortar el drenaje vertical en estas zonas de gran acumulación de agua, el flujo hacia los taludes puede crear problemas de inestabilidad.

En caso de existir escombros finos degradables, debe evitarse la formación de blandones en las plataformas que puedan dar lugar a charcos o acumulación de agua.

G. Medidas de seguridad

Las medidas de seguridad previstas se definirán en un *Programa de Seguridad y Salud Laboral* que contendrá, como mínimo, los siguientes apartados:

- Memoria descriptiva de los procedimientos, equipos técnicos y medios auxiliares que se deban utilizar, identificando los riesgos laborales que no puedan eliminarse y especificando y valorando las medidas preventivas y protectoras. Los riesgos más habituales son los siguientes:
 - S Caída de maquinaria pesada y camiones por el talud. Definición de taludes, ancho de pistas, capas antideslizantes, drenajes, etc.
 - S Rodadura de bloques a grandes distancias talud o ladera abajo. Definición de distancias y medidas de seguridad a infraestructuras, edificios, etc.
 - S Vertido de bloques sobre personas que circulan por la zona inferior de los taludes.
 - S Choques de los equipos por maniobras mal coordinadas.
 - S Problemas de movilidad de equipos trabajando sobre taludes, zonas blandas, etc.

También se describirán los servicios sanitarios en función del número de trabajadores.

No se permitirá el cruce de maquinaria por debajo de líneas eléctricas aéreas, salvo por los puntos especialmente preparados para ello.

Se mostrará especial precaución en las operaciones de excavación de zanjas, apertura de caminos, actividades cercanas a conducciones de agua, etc., cuando estas operaciones tienen lugar al pie de las escombreras situadas sobre laderas en las que pueden inducirse deslizamientos. En ningún caso se podrán excavar zanjas a menos de 3 m del pie final de la escombrera, o a menos de 1,5 veces el espesor del suelo susceptible de fluencia.

Introducción

No se deberá superar en cada banco o tongada la altura alcanzable por las palas o excavadoras. En el caso de escombreras muy altas el trabajo debe hacerse por bancos, de arriba a abajo, dejando bermas cada 10 m aproximadamente.

En cualquier escombrera en la que se aprecien grietas o deformaciones indicativas de un posible deslizamiento profundo, se paralizarán inmediatamente las operaciones de vertido en el área afectada, estableciendo unos piquetes de delimitación y realizando observaciones sistemáticas de movimientos, evolución de grietas, etc. Si el deslizamiento fuera inminente y pudiera ocasionar daños graves, se darán los oportunos avisos y órdenes de desalojo, realizando las obras de contención, drenaje o estabilización que permita la evolución de los movimientos.

- Pliego de condiciones particulares en el que se tendrán en cuenta las normas legales y reglamentarias aplicables, así como las prescripciones a cumplir relativas a las características, utilización y conservación de las máquinas, útiles, herramientas, sistemas y equipos preventivos.
- Planos en los que se desarrollarán los gráficos y esquemas necesarios para la mejor definición y comprensión de las medidas preventivas definidas en la memoria.
- Mediciones de todas aquellas unidades o elementos de seguridad y salud en el trabajo.
- Presupuesto que cuantifique el conjunto de gastos previstos para la aplicación y ejecución del estudio de seguridad.

H. Estudio de Impacto Ambiental

En aquellos casos en que sea preciso, se realizará un Estudio de Impacto Ambiental en el que se contemplarán todas las medidas oportunas para el control y disminución de dicho impacto y la recuperación posterior del depósito.

1.4. MANTENIMIENTO Y CONTROL DE LA ESCOMBRERA

En la fase de proyecto, el promotor de la instalación debe definir un plan de mantenimiento y control de la escombrera en función de las características de la misma que abarcará un período de cinco años. Este plan de control debe garantizar la estabilidad del depósito, la ejecución del programa de restauración, la minimización del impacto ambiental, etc., de forma que se alcance la integración del depósito en el entorno de la zona en el período considerado.

El plan de control debe definir las magnitudes que serán objeto de control, tanto permanentes como periódicas. En ambos casos, se detallará y justificará la instrumentación a instalar en la escombrera: tipo de sensores, ubicación, frecuencia de toma de datos, etc.

Este plan también debe detallar los informes que se deben presentar a la Autoridad Minera, definiendo las magnitudes a medir y la periodicidad con la que serán enviados. Tanto el plan de control inicial como sus posteriores revisiones se someterán a la aprobación de la Autoridad Minera competente.

1.5. PROYECTO DE ABANDONO

Dentro del proyecto de instalación se hará una memoria con una estimación o anteproyecto de abandono definitivo que incluirá todos aquellos aspectos técnicos que se prevean de utilidad (forma topográfica final, controles, desagües finales, etc.)

Transcurrido el período de tiempo definido en los programas de restauración y mantenimiento y control, y garantizada la estabilidad e inocuidad del depósito, se enviará a la Autoridad Minera competente un proyecto de abandono en el que se justifiquen las condiciones anteriores y se recojan todas aquellas actuaciones complementarias para su mantenimiento.

En cualquier caso, en el proyecto de abandono se incorporarán las soluciones previstas para:

- S Proteger los taludes exteriores de los terraplenes contra la erosión superficial y la degradación de los materiales.
- S Prevenir combustiones espontáneas en los estériles.
- S Dotar al conjunto de sistemas de drenaje de un funcionamiento a largo plazo.

Las escombreras deben quedar protegidas frente a la erosión evitando que el agua recogida en las bermas o plataformas corra sobre los taludes. Por tanto, deben dejarse las superficies con una contrapendiente hacia el interior no inferior al 2 %, disponiendo al final las oportunas cunetas de recogida y desvío.

Cuando se prevea una evolución desfavorable de una determinada escombrera se planificará el establecimiento de un área de protección al pie de la misma, suficientemente aislada y capaz de almacenar los estériles desprendidos o de rodadura y las masas deslizadas.



Foto 1.4. Escombrera restaurada.

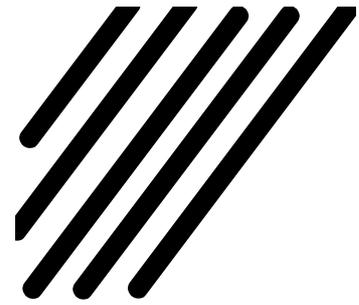
Introducción

También se debe determinar el sistema de auscultación que debe permanecer operativo.

Una vez ejecutado el proyecto de abandono, la empresa propietaria presentará una solicitud de abandono y la Autoridad Minera emitirá un *Acta Provisional de Abandono* en la que se fija un plazo razonable y justificado de responsabilidad compartida a partir del cual se considerará el depósito abandonado y clausurado, y donde se emitirá un *Acta Definitiva de Abandono*.

1.1. DEFINICIONES GENERALES	1-1
1.2. TIPOLOGÍA Y DESCRIPCIÓN DE LAS ESCOMBRERAS	1-2
1.3. PROYECTO CONSTRUCTIVO	1-4
1.3.1. Memoria	1-5
1.3.2. Planos	1-8
1.3.3. Cálculos de estabilidad	1-8
1.3.4. Anexos	1-9
1.4. MANTENIMIENTO Y CONTROL DE LA ESCOMBRERA	1-14
1.5. PROYECTO DE ABANDONO	1-15

capítulo 2



TIPOS DE ESTÉRILES MINEROS Y SUS PROPIEDADES

2.1. INTRODUCCIÓN

Las propiedades de los estériles tienen gran influencia sobre la estabilidad y el diseño de las escombreras. A la hora de diseñar estas estructuras, en la práctica se puede recurrir a experiencias de casos similares y, también, tener en cuenta algunas clasificaciones empíricas propuestas por diferentes autores, aunque lo más acertado es estudiar y determinar mediante ensayos todas las propiedades de los materiales que realmente se van a depositar en las escombreras.

La resistencia, durabilidad y granulometría de los estériles varían considerablemente en cada lugar estudiado y sobre la geología y operaciones mineras. Se pueden realizar ciertas generalizaciones referentes a la calidad esperada de los estériles, y el diseño debe atenerse a la caracterización más exacta de la resistencia, durabilidad y granulometría, y sus variaciones más probables. La planificación de las fases de vertido puede minimizar los problemas producidos por materiales de mala calidad, tales como la inclinación adecuada del talud o la instalación de una capa de drenaje.

La observación del comportamiento de cada tipo de roca expuesta a los elementos climatológicos también ayudará al diseño correcto de la escombrera. La mayor dificultad estriba en el conocimiento de la granulometría, pero un cuidadoso diseño de la voladura y la comparación con otras explotaciones de semejantes características, pueden proporcionar la información necesaria.

En el supuesto de que no se contara con datos y métodos para evaluar las características geomecánicas de los materiales, se aconseja adoptar un diseño de la escombrera conservador y realizar controles durante la fase de la construcción.

En este capítulo se describen las principales propiedades de los estériles, así como los métodos de ensayo más adecuados.

2.2. CLASES DE ESTÉRILES MINEROS

Una descripción básica de los estériles mineros debe incluir una descripción de cada tipo de roca y el porcentaje contenido de cada uno de ellos.

Tipos de estériles mineros y sus propiedades

En la Tabla 2.1 se presenta un resumen de las propiedades físicas y químicas de los materiales vertidos en las escombreras, así como del tipo de ensayo a efectuar.

TABLA 2.1.

PROPIEDAD DEL MATERIAL	APLICACIÓN	ENSAYO EN CAMPO	ENSAYO EN LABORATORIO
DESCRIPCIÓN: S Litología S Composición S Microestructura S Forma de las partículas	S Clasificación S Durabilidad S Correlación entre resistencia intacta y al corte	S Descripción en campo S Clasificación preliminar S Sondeos con recuperación de testigos	S Análisis microscópico S Clasificación detallada
GRANULOMETRÍA	S Correlación entre resistencia y conductividad hidráulica S Evaluación del potencial de separación	S Estimación visual S Examen en campo S Ensayo de separación en campo	S Cribado S Medida de la humedad (hidrómetro)
PLASTICIDAD DE LOS FINOS	S Clasificación S Correlación con la resistencia al corte S Índice del contenido de arcilla	S Resistencia seca, dilatación y dureza	S Límite de Atterberg en finos
RESISTENCIA INTACTA	S Durabilidad S Correlación con la resistencia al corte	S Ensayo de carga puntual S Dureza en campo	S Ensayo triaxial S Ensayo de compresión simple
RESISTENCIA AL CORTE	S Criterio de rotura S Estabilidad de escombreras	S Ensayo de corte en campo S Ángulo de reposo	S Ensayos de corte directo o triaxial
MINERALOGÍA Y PETROGRAFÍA	S Índice de hinchamiento S Durabilidad S Microestructura S Clasificación	S Ensayo de acidez para carbonatos	S Difracción de R-X S Límite de Atterberg en finos
DURABILIDAD	S Reducción de la conductividad hidráulica S Duración en firmes y base de cimentación S Reducción de la resistencia al corte	S Meteorización de la superficie	S Durabilidad al desmenuzarse S Ensayos de abrasión
CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	S Estimación de la infiltración S Predicción de las condiciones piezométricas S Cálculo del drenaje	S Correlación basada en la granulometría	S Compactación y permeabilidad
CONSOLIDACIÓN Y ASENTAMIENTO	S Resistencia al corte S Consolidación y asentamiento	S Peso unitario a partir del esponjamiento	
GEOQUÍMICA	S Impacto medioambiental S Riesgo por lixiviación de metales pesados. Adsorción S Drenajes ácidos. Neutralización	S Determinación de surgencias de agua S Medida del pH en flujos de agua, conductividad, etc.	S Lixiviación en columna S Celdas de humedad S Medida de la acidez S Ensayos para determinar contaminantes

Fuente: Mined Rock and Overburden Piles (1991).

2.3. GRANULOMETRÍA

La granulometría de los estériles tiene una influencia directa sobre la permeabilidad y la resistencia al corte. Por lo general, los materiales gruesos con pocos finos (menos del 10 % de Malla 200) tienen buena resistencia y alta conductividad hidráulica.

El tamaño de los estériles de las escombreras depende de una serie de factores como: litología, dureza, discontinuidades del macizo rocoso, técnica de arranque y/o voladura, manipulación y transporte, método de vertido, etc. La granulometría puede variar con el tiempo debido a que los materiales experimentan cambios físicos y químicos al entrar en contacto con el aire y el agua (oxidación, heladas, esponjamiento, meteorización y otros).

Para caracterizar los materiales de una escombrera, es necesario obtener su curva granulométrica y determinar el tamaño máximo de partículas, así como realizar un análisis en laboratorio de la fracción fina. Un método más exacto para determinar la granulometría consiste en hacer un cribado en campo de todos los materiales que se vierten en la escombrera, pero es poco empleado porque su coste es muy alto.

Cuando el porcentaje de finos es superior al 10 %, éstos controlan o tienen gran influencia sobre las propiedades de los materiales vertidos en la escombrera (resistencia al corte, conductividad hidráulica, grado de oxidación, formación de aguas ácidas, etc.).

Se recomienda realizar muestreos periódicos a todo el material que se vierte en la escombrera para verificar la granulometría y determinar las variaciones en función al área de explotación y la técnica de arranque de roca empleada, entre otros.



Foto 2.1. Bloques gruesos de roca al pie de una escombrera.

Tipos de estériles mineros y sus propiedades

La granulometría está muy relacionada con el fenómeno de la segregación, producido cuando los estériles transportados con camión o pala se vierten en la cresta del talud. Es muy habitual utilizar la fracción gruesa generada en la segregación natural, y que se acumula en el pie del talud, como método de drenaje del agua de las escombreras. Para determinar la capacidad de drenaje se deberá conocer tanto la cantidad como el tipo de material segregado. Esta operación es difícil de realizar debido a la gran variabilidad de los tamaños y formas de las rocas que impide una medida homogénea de las mismas.

En general, en la segregación que se produce en un talud se pueden distinguir tres zonas:

- S La concentración de finos en la cresta del talud.
- S Una distribución uniforme de material de tamaño intermedio en el resto del talud hasta el pie.
- S Una amplia dispersión de material grueso que se extiende más allá del pie del talud.

Internamente, la escombrera está compuesta de una serie de capas paralelas a la cara de vertido donde, alternativamente, se suceden las compuestas por granos finos y las de granos gruesos. Evidencia de esta estratigrafía se muestra en la Fig. 2.1. En esta figura también se puede observar que los granos finos situados en una capa exterior no suelen poder pasar a través de capas de granos gruesos más profundas.

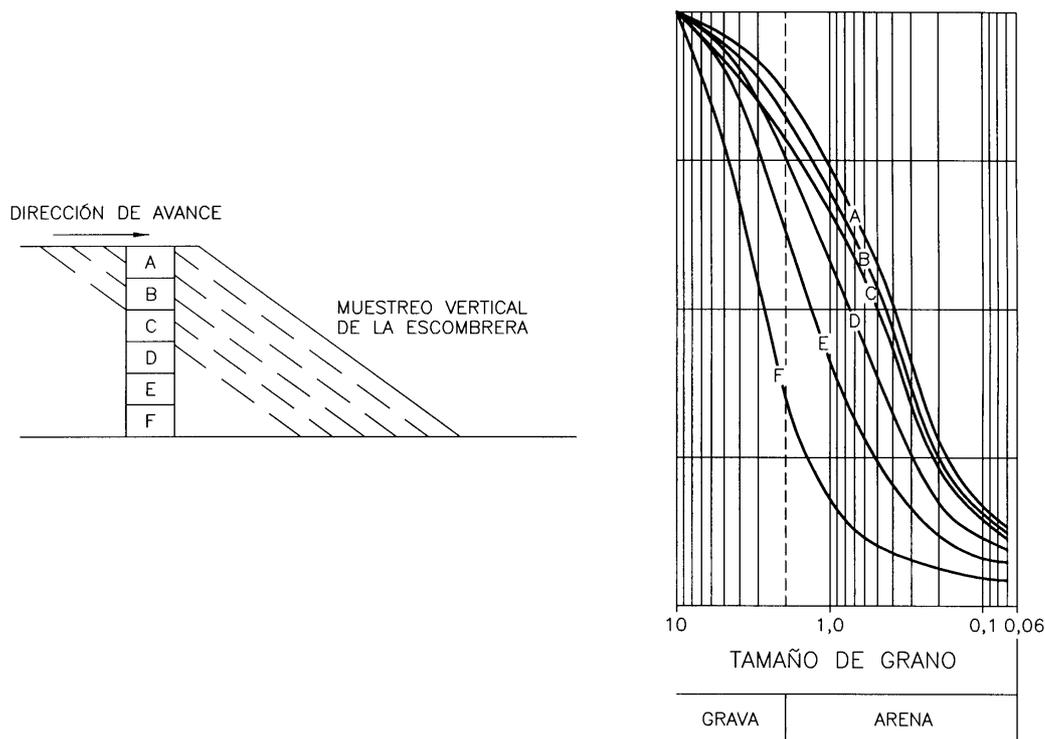


Figura 2.1. Esquema de las distintas granulometrías presentes en una escombrera (Marcus, J.J., 1997).

La altura del talud prácticamente no influye en la distribución granulométrica de la segregación, siguiendo un gráfico semejante al de la Fig. 2.1. Sin embargo, la cantidad de material segregado será algo menor. Por otra parte, y en relación a la influencia del tamaño de grano, se puede decir, como regla general, que siempre aparecen las tres zonas de segregación anteriormente definidas, pero que éstas serán más pronunciadas a

medida que el tamaño de grano aumenta. La aparición de un material más fino también disminuye el efecto de segregación.

Por otro lado, la construcción en capas relativamente finas produce un depósito más homogéneo. En ciertos casos, pueden ser necesarias unas capas especiales de drenaje para evitar la saturación de los materiales.

También se puede distinguir entre los efectos que se producen en la segregación al realizarse un vertido por empuje (tractor) de un vertido desde una cierta altura (volquete, pala cargadora). En el primer caso disminuye la segregación de finos en la zona alta del talud, pero las partículas gruesas se siguen acumulando en el pie, disminuyendo, en general, la cantidad de material segregado. Esto es debido a que las partículas gruesas ruedan más cuando el vertido se hace desde una cierta altura, como consecuencia de la aparición de un momento en las mismas que hace que las partículas rueden hasta el final del talud a no ser que la pendiente del mismo no sea suficiente o que choquen con partículas mayores, mientras que en el vertido por empuje sólo giran las partículas que se hayan vertido en la superficie del talud ya que el resto quedarán incluidas en los finos.

En relación a la estabilidad, cuando el vertido es por empuje la posibilidad de producirse deslizamientos aumenta, mientras que en vertidos desde altura este efecto disminuye ya que el momento que obtienen las partículas al deslizar en la pala, es suficiente para que las partículas rueden hasta el final del talud, formando un ángulo algo menor que el ángulo de rozamiento interno.

En cuanto a la hidrogeología de una escombrera donde se haya producido segregación, destaca el fenómeno de que los finos acumulados en la zona alta del talud impiden el paso de agua, produciéndose infiltraciones a lo largo del propio talud de la escombrera, por lo que un correcto drenaje del pie de la misma favorece la estabilidad.

Para finalizar, en la Tabla 2.2 aparecen los factores por los que se tienen que multiplicar las fracciones originales relativas al D_{80} , D_{50} y D_{20} del material vertido.

TABLA 2.2

	D_{80}				D_{50}				D_{20}			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Material original	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Cresta de talud	0,17	0,26	0,59	0,92	0,12	0,16	0,42	0,84	0,11	0,17	0,33	0,63
Zona intermedia	0,53	0,83	0,83	0,92	0,57	0,77	0,75	0,81	0,53	0,75	0,67	0,68
Pie de talud	1,39	1,57	1,22	1,75	2,17	1,96	1,88	1,91	3,94	4,17	4,44	3,68

Fuente: R.S. Nichols (1986).

- 1: Vertido en altura, material grueso, talud alto.
- 2: Vertido en altura, material grueso, talud bajo.
- 3: Vertido en altura, material fino, talud bajo.
- 4: Vertido por empuje, material grueso, talud bajo.

2.4. PLASTICIDAD DE LOS FINOS

Si aparece una cantidad considerable de componentes de tamaño limo o menor en los estériles, se deberán determinar los Límites de Atterberg (Límite líquido y Límite plástico) en laboratorio. La plasticidad de los finos puede tener un impacto sobre las características de resistencia al corte del material, y debe ser indicativa del tipo de minerales arcillosos contenidos en él. Los Límites de Atterberg también se determinarán en rocas sedimentarias de tamaño fino mediante desagregación mecánica. En la Tabla 2.3 se muestran unos valores de esta propiedad.

TABLA 2.3. Características plásticas.

SUELO	LÍMITE LÍQUIDO	LÍMITE PLÁSTICO	ÍNDICE DE PLASTICIDAD
Arcilla fina	32	18	14
Arcilla gruesa	80	28	52
Arcilla arenosa	40	20	20

Fuente: Pit Slope Manual (1980).

2.5. RESISTENCIA INTACTA

La resistencia de los fragmentos de roca intactos influye en la durabilidad y resistencia al corte de los materiales de la escombrera. Los métodos empíricos utilizados para determinar dicha resistencia al corte del material (Barton y Kjaernsli) requieren un conocimiento de la resistencia del material intacto. En investigaciones preliminares de escombreras pequeñas, donde los estériles están sometidos a relativamente bajos esfuerzos (menores de un 25-50 % de la resistencia a compresión de la roca intacta), o donde los estériles sean muy resistentes, la resistencia intacta se conocerá a partir de relaciones empíricas dependiendo del tipo de roca, por ensayos de dureza en campo y con el índice de carga puntual en los testigos de perforación. En escombreras grandes, donde los materiales de la escombrera están sometidos a esfuerzos relativamente altos o son frágiles, los esfuerzos entre partículas alcanzan o superan la resistencia intacta de la roca, produciéndose el aplastamiento y rotura de las partículas. En este caso, deben realizarse estudios más detallados de la resistencia intacta que consistirán en ensayos de compresión simple.

En la Tabla 2.4 se muestran unos valores de las propiedades mecánicas representativos de ciertas rocas.

TABLA 2.4. Propiedades mecánicas de las rocas.

TIPO DE ROCA	COEFICIENTE DE POISSON	MÓDULO DE DEFORMACIÓN (kPa)	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (kPa)
Diorita	0,26-0,29	75-108	69-103
Gneiss	0,15-0,20	83-119	41-83
Granito	0,23-0,27	73-86	59-172
Caliza	0,27-0,30	87-108	31-103
Cuarcita	0,12-0,15	82-97	103-138
Pizarra	0,15-0,20	79-112	21-55
Arenisca	0,15-0,35	28-69	55-138

Fuente: Pit Slope Manual (1980).

2.6. RESISTENCIA AL CORTE

Para conseguir un análisis y un diseño correctos es fundamental tener un conocimiento de las características de resistencia al corte de los materiales de las escombreras. La resistencia efectiva al esfuerzo cortante de estos estériles depende de una amplia gama de parámetros interrelacionados, entre los que se incluyen la resistencia de la partícula intacta y resistencia anisotrópica, angulosidad de las partículas, granulometría, rugosidad de las superficies y propiedades de fricción, composición litológica, mineralogía y grado de saturación. En este sentido, la resistencia al corte puede variar con el tiempo debido a factores como la consolidación; se puede producir la degradación por los efectos de congelación/descongelación, hinchamientos o desgaste; oxidación; filtración y cambios químicos; además de deformaciones inducidas por los cimientos o reagrupamientos internos y migración de finos.

También está comprobado que la resistencia al corte es función de la tensión de confinamiento, proponiéndose varios modelos para materiales de relleno (Marshall, 1973; Barton, 1981; Hoek, 1983). Excepto en caso de producirse colapso que incluya la saturación de los estériles finos, es habitual suponer resistencias a fricción iguales o mayores que el ángulo de rozamiento interno. La relación entre la tensión de confinamiento y el ángulo de rozamiento interno se puede ver en la Fig. 2.2.

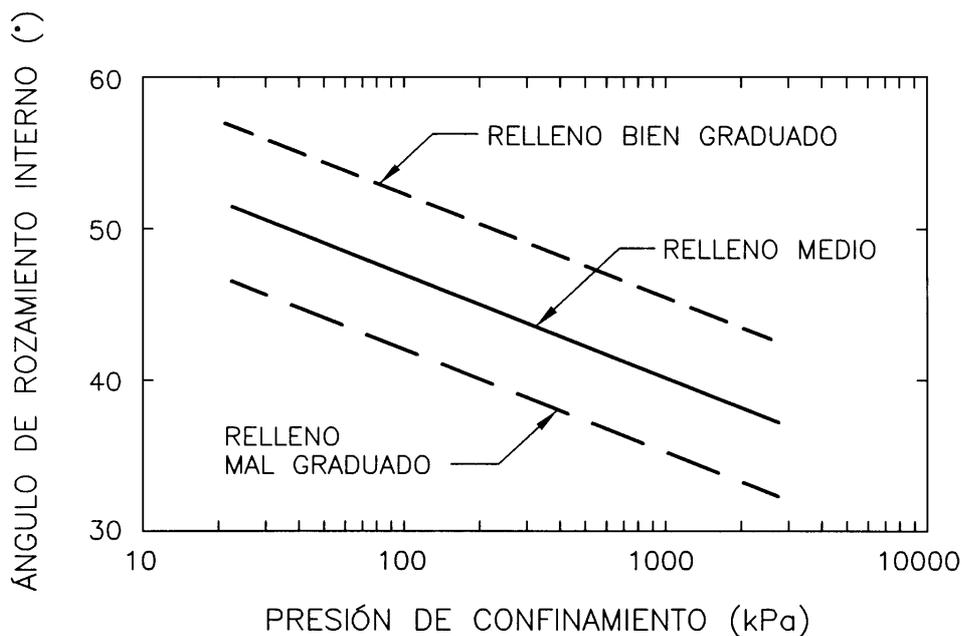


Figura 2.2. Resistencia de los estériles (Marcus, J.J., 1997).

Marshall (1973) predice una resistencia al corte basada en la teoría de Mohr-Coulomb a partir de los resultados de una larga serie de ensayos triaxiales. Barton y Kjaernsli (1981), por su parte, estiman la resistencia al corte indirectamente a partir del rozamiento entre partículas, la compresión y la rugosidad de las mismas. Hoek (1983), por último, relaciona la resistencia al corte con la resistencia a compresión mediante coeficientes empíricos que varían dependiendo del tipo de roca y de la calidad de la masa rocosa.

En el análisis y diseño de las escombreras, se suele determinar la resistencia al corte de los materiales de éstas suponiendo el criterio de rotura lineal de Mohr-Coulomb, sin cohesión y con un ángulo de rozamiento

Tipos de estériles mineros y sus propiedades

igual al ángulo de reposo natural de los materiales de la escombrera. Dicho ángulo de reposo es fácil de averiguar en campo y su valor suele oscilar entre 35° y 40°. Esta teoría relativamente simple para la evaluación de la resistencia al corte se puede considerar válida para escombreras de pequeño a medio tamaño, donde las tensiones internas son bajas en comparación con la resistencia de la roca intacta. Además, se ajusta a los materiales de escombrera que contienen una cantidad limitada de finos (menor del 10 %) y no estén sometidos a degradación.

Para escombreras más grandes y complejas, donde las tensiones internas son mayores, las deformaciones que aparecen debido a la consolidación y a los esfuerzos y ajustes internos son considerables y, además, aparece una proporción significativa de finos, por lo que se recomienda un mayor conocimiento de la resistencia al corte. En estos casos, se puede optar por varias teorías. Una de ellas sería adoptar suposiciones muy conservadoras de resistencia al corte, sin embargo, esto puede dar como resultado un diseño de la escombrera excesivamente conservador y poco económico. Otra alternativa es el empleo de técnicas empíricas como las propuestas por Barton y Kjaernsli (1981) o Hoek (1983). En este caso, la comparación de los resultados con datos publicados por Marshall (1973) determina la validez de dichos resultados. La escasez actual de datos de ensayos publicados de resistencia al corte de rocas y la consecuente falta de calibración de los criterios de rotura, provoca que la fiabilidad de las predicciones empíricas en cuanto a los parámetros de resistencia al corte no sea total, por lo que deben ser complementados con algún ensayo utilizando alguna de las aproximaciones descritas a continuación.

Pueden realizarse ensayos de corte directo a gran escala o ensayos triaxiales de muestras representativas de los materiales de la escombrera, sin embargo, dichos ensayos son complicados y costosos, además de la escasez de instalaciones disponibles. Es más práctico realizar ensayos de corte directo o triaxiales sobre la fracción fina del material de la escombrera. Los ensayos serán realizados con una gran variedad de densidades iniciales y cargas normales o confinadas, que simulen los diferentes esfuerzos y densidades que aparecen en la escombrera. Las deformaciones halladas durante los ensayos deben ser suficientes para determinar la resistencia al corte tanto residual como de pico. Estos ensayos también pueden ser realizados en materiales degradados si es probable que aparezca dicha degradación en la escombrera. Los resultados de los ensayos deben ser evaluados y se deberán elegir los parámetros de resistencia suficientemente conservadores para el estudio de la estabilidad a corto y largo plazo.

La reducción lineal del ángulo de rozamiento interno efectivo, B' , con el logaritmo del esfuerzo normal efectivo observado en las juntas de roca según la ecuación siguiente, también se aprecia en ensayos triaxiales de materiales angulosos y gravas:

$$B' = B_r - i \cdot \log \left(\frac{JCS}{\sigma'_n} \right) + Q_r$$

Por lo tanto, si se toma un solo valor de c y B en el diseño de una escombrera, aparecerá un factor de seguridad erróneo. De hecho, tanto en juntas de roca como en estériles, los valores de B' dependen del tamaño de la muestra, de los esfuerzos sufridos, de la rugosidad de la superficie y de la resistencia a compresión de la roca, de forma que los ángulos de rozamiento interno son mayores para muestras pequeñas y muy altos cuando las tensiones son bajas, como en el pie o en la cara libre de un talud.

En los estudios anteriormente señalados de Barton y Kjaernsli (1981) se muestra que el valor de B' en

estériles de mina puede ser cuantificado por la rugosidad equivalente, R , y por la resistencia equivalente, S , según la Fig. 2.3.

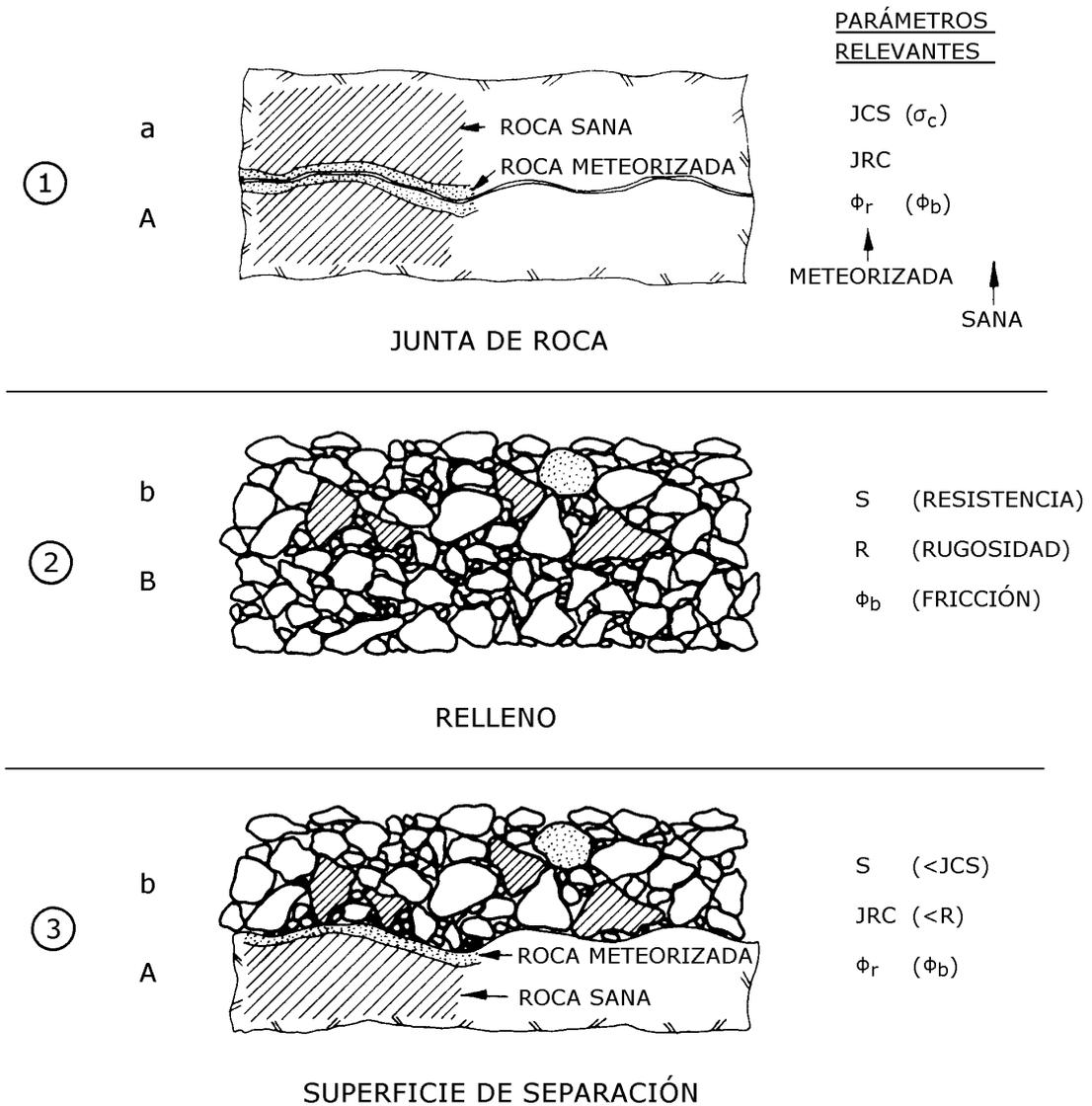
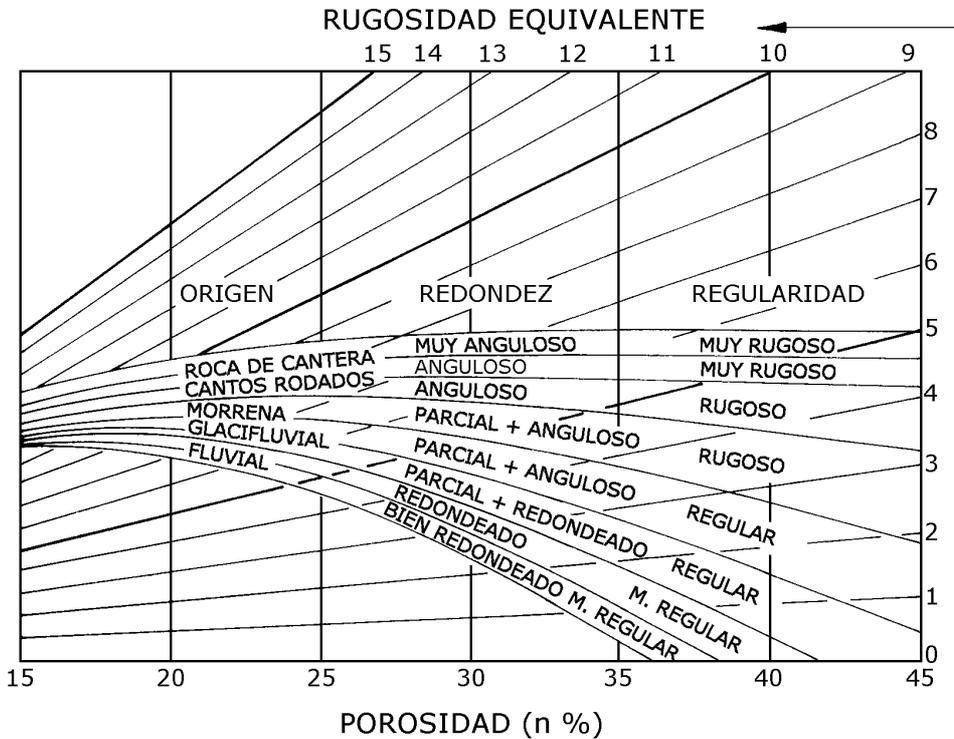


Figura 2.3. Análisis empírico para la estimación de la resistencia al corte de juntas de roca, estériles y contacto entre ambas (Barton, N., 1982).

El valor de R depende de la porosidad del material y de la rugosidad y geometría de las partículas. La rugosidad equivalente, que es análoga al valor JRC de las juntas de roca, puede ser estimado utilizando la Fig. 2.4.

Tipos de estériles mineros y sus propiedades

Por ejemplo, un material vertido que presente una porosidad del 35 % probablemente tendrá una rugosidad equivalente de 5 ó 6 (partículas angulosas).



EJEMPLOS DEL GRADO DE REDONDEZ				
ROCA DE CANTERA	CANTOS RODADOS	MORRENA	MATERIAL GLACIFLUVIAL	MATERIAL FLUVIAL

Figura 2.4. Método para estimar la rugosidad equivalente (R) de un estéril de mina (Barton, N., 1982).

Un método empírico para la estimación de la resistencia equivalente de partículas de roca aparece en la Fig. 2.5. Este parámetro es análogo al valor de compresión de juntas JCS y también depende de la escala.

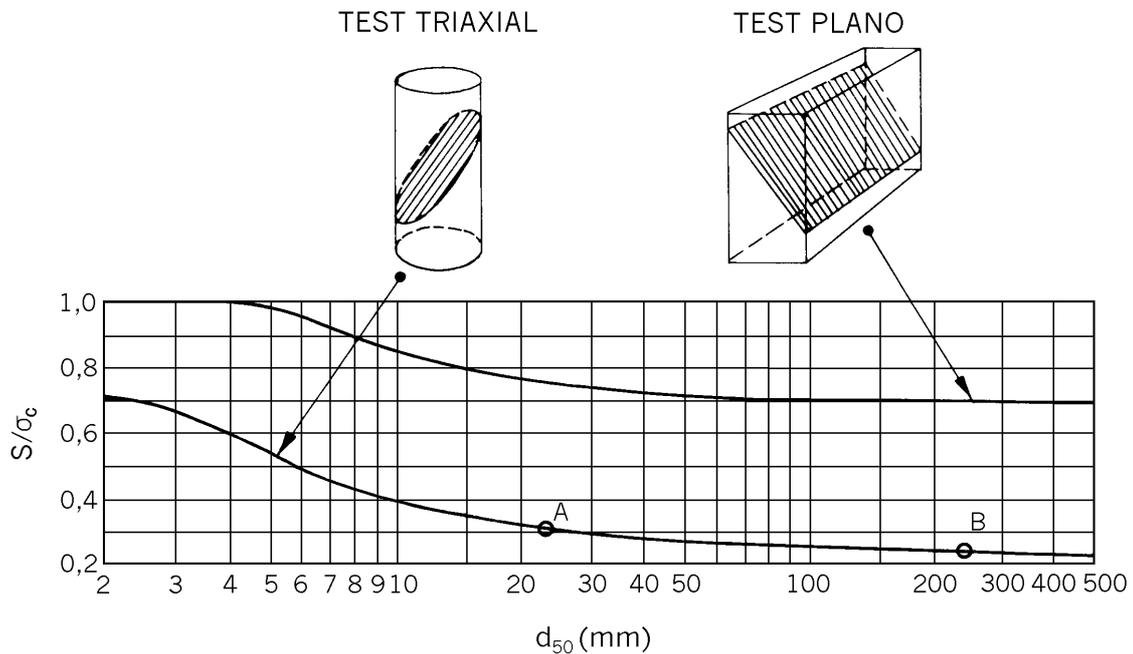


Figura 2.5. Método para estimar la resistencia equivalente (S) de un estéril de mina (Barton, N., 1982).

El ángulo de rozamiento interno efectivo en estériles se puede estimar con la siguiente ecuación:

$$B' = B_b + R \cdot \log \left(\frac{S}{\sigma'_n} \right)$$

Un ejemplo de aplicación para estériles pórfidos es el siguiente:

$\sigma_c = 150$ MPa, $d_{50} = 250$ mm, $S \approx 30$ MPa (Fig. 2.5)

$N = 35$ %, partículas angulosas, R ≈ 6 (Fig. 2.4)

$B_b = 30^\circ$ (obtenido a partir de ensayos).

Aplicando la ecuación anterior se obtienen los siguientes valores de B' :

σ'_n (MPa)	B'
0,1	45°
1,0	39°
10	33°

En este caso, se estudian los valores de B' al multiplicar los valores de las tensiones por 10. Este grado de dependencia de las tensiones se puede ampliar hasta cinco órdenes de magnitud. La Fig. 2.6 muestra como esta influencia de la tensión modifica los valores de B' que aparecen en las distintas zonas de una escombrera, suponiendo una distribución triangular de las tensiones verticales.

Tipos de estériles mineros y sus propiedades

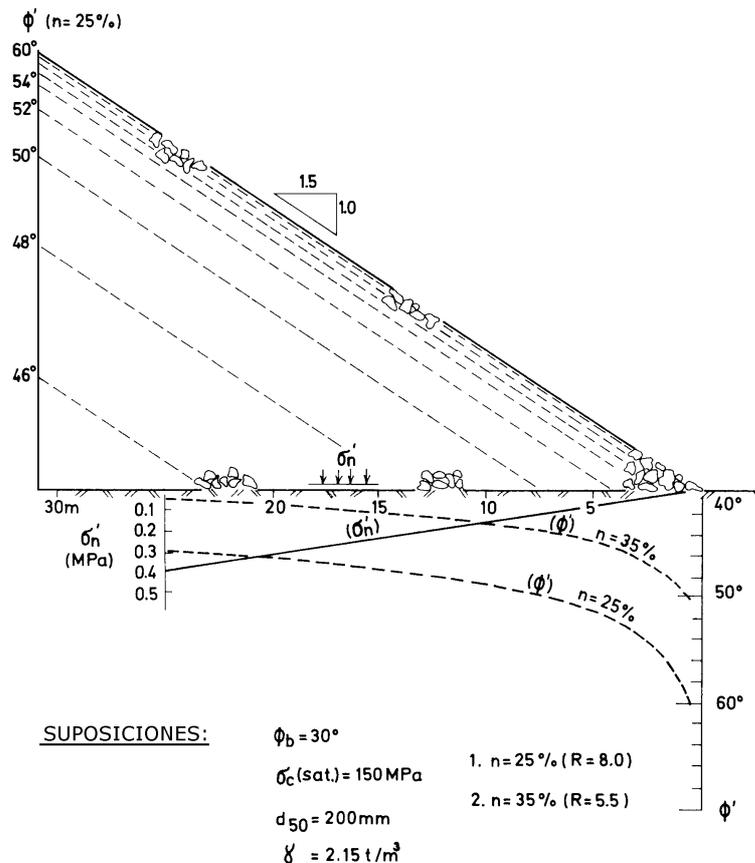


Figura 2.6. Variación de B' a lo largo del talud de una escombrera (Barton, N., 1982).

Como conclusión de este estudio, se puede decir que la estabilidad superficial y los ángulos de inclinación del talud pueden ser erróneamente calculados, ya que algunas decenas de metros bajo la superficie de la escombrera, la resistencia al corte puede ser 10-15 % menor que en la superficie o en el pie del talud, por lo que es más probable una rotura profunda que manifestaciones de inestabilidad superficial.

En cuanto a los ensayos realizados con los materiales estériles de mina, existe una clara limitación del estudio de la resistencia al corte en laboratorio en referencia a muestras a gran escala, y la consecuente falta de conocimiento de su granulometría y porosidad. El desarrollo del método de la rugosidad equivalente, y su posible extrapolación a la variación de la resistencia con la tensión, proporciona un medio de interpretación de ensayos a gran escala de estériles sujetos a muy bajas tensiones, de manera similar a los ensayos de inclinación en juntas de bloques de roca. El método de ensayo de inclinación de estériles se muestra en la Fig. 2.7.

Se trata de un armazón inclinado de varios metros de longitud, donde uno de sus extremos es elevado hidráulicamente de manera semejante a la elevación de la caja de un camión.

El máximo ángulo de inclinación admisible, α° , antes de la rotura de la muestra tomará un valor aproximado entre 55° y 65° , al actuar una tensión efectiva normal en la superficie de rotura muy baja. El ángulo $\alpha^\circ = B'$ se puede extrapolar por estimación de los valores de R y B_b , y un cálculo inverso del valor de R a partir de la última ecuación. Así, los errores inevitables en el cálculo de S y B_b son automáticamente compensados con el valor de R , por lo que la estimación final de B' es muy fiable.

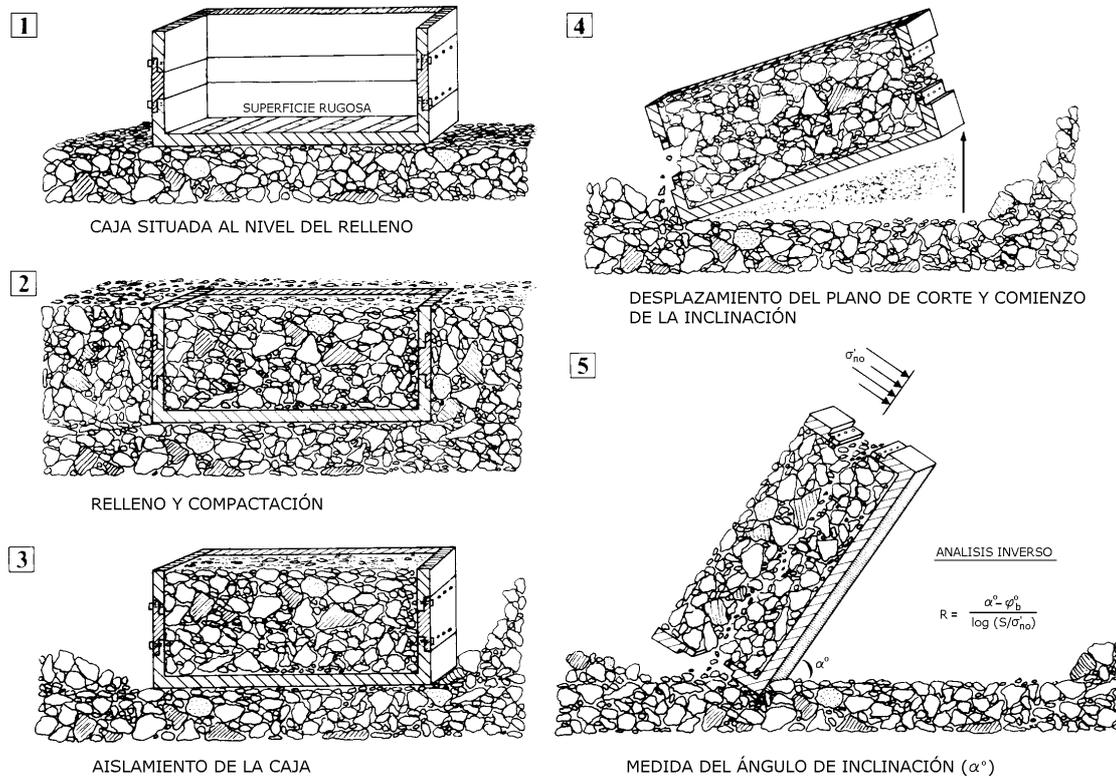


Figura 2.7. Método de medida de la resistencia al corte de estériles rocosos (Barton and Kjaernsli, 1981).

Este ensayo de inclinación tiene la ventaja añadida de que la deformación no uniforme y la rotura progresiva comunes en los ensayos convencionales de resistencia al corte, son mucho menores debido a la naturaleza más uniforme de las tensiones normales y tangenciales gravitatorias inducidas a la muestra.

Como conclusiones se pueden obtener las siguientes:

1. El corte entre las dos superficies de una junta de roca y entre partículas de una escombrera provoca una variación similar en los valores de la resistencia al corte de pico. Sin embargo, las juntas de roca, normalmente, alcanzan dicha resistencia con deformaciones mucho menores que en los materiales de escombreras.
2. El ángulo de rozamiento interno efectivo de pico de juntas de roca o estériles puede ser cuantificado por una rugosidad equivalente, JRC o R, una resistencia equivalente a compresión de la partícula, JCS o S, y por el ángulo de rozamiento interno residual o intacto, respectivamente. Cada uno de estos seis

Tipos de estériles mineros y sus propiedades

parámetros puede ser estimado a partir de tablas, usando el martillo de Schmidt o por ensayos de inclinación.

3. El comportamiento análogo de las juntas de roca y de los fragmentos de estériles se extiende a los efectos del tamaño de partícula en la resistencia, y a la relación lineal entre el esfuerzo normal efectivo y el ángulo de rozamiento interno efectivo. Los valores de B' tienden a ser mayores en el pie del talud y semejante a los valores obtenidos en la cara libre del mismo.
4. Los efectos del tamaño de las partículas se pueden eliminar con la realización de ensayos de inclinación de bloques de roca de tamaño natural al aplicar su propio peso. En el caso de estériles, este ensayo se debe realizar con todo el tipo de granulometría que aparezca.
5. En casos donde no se disponga de grandes muestras, se pueden aplicar distintos métodos de escala como JRC y JCS para juntas de roca, y los valores de S para los estériles.
6. Se recomienda que los valores a escala de resistencia al corte sean usados en superficies de rotura donde la tensión tangencial no supere la resistencia de pico.
7. Se puede alcanzar una modelización completa de resistencia al corte-desplazamiento y tensión-deformación en estériles usando el concepto de movilización de la rugosidad. El término JRC se usará en juntas de roca y el valor R con estériles.
8. Una mayor incertidumbre permanece en los análisis de estabilidad de taludes. La continuidad de juntas individuales es difícil de estimar y la posibilidad de interacciones entre juntas también es difícil de cuantificar. Suponer cohesión nula es, probablemente, la precaución más utilizada cuando las juntas tienen diferentes orientaciones.

2.7. MINERALOGÍA Y PETROGRAFÍA

La presencia de minerales arcillosos de baja resistencia o la aparición de hinchamientos, microgrietas y otras texturas, pueden influir en la durabilidad y resistencia de los materiales de la escombrera. Un conocimiento de la mineralogía y petrografía de las rocas puede ayudar también en la clasificación y descripción de las mismas. Donde los estudios preliminares indiquen la presencia de minerales arcillosos, expansivos o microestructuras adversas, se podrá utilizar difracción de rayos X o microscopio electrónico de exploración.

Además, se deben determinar los Límites de Atterberg para muestras desagregadas de rocas sedimentarias de grano fino u otras rocas que contengan minerales arcillosos, para ayudar a la identificación de los tipos de minerales que pueden estar presentes.

2.8. DURABILIDAD

La durabilidad y el potencial de degradación física y química de la roca influye en la resistencia al corte a largo plazo y la conductividad hidráulica de la escombrera, así como en la circulación y filtración de los fluidos en la misma. Las características del desmoronamiento de las rocas son muy importantes en la exposición a sulfuros y en la generación de ácidos, así como en la estabilidad de la superficie de la escombrera, en relación

al desplome y erosión. Además, la meteorización y el derrumbamiento mecánico de los materiales de la escombrera puede ser acelerado por las condiciones de esfuerzo que aparecen en las grandes escombreras, por lo que se deben tener en cuenta.

El conocimiento cualitativo de la durabilidad debe estar basado en la meteorización observada, en la estanqueidad de las escombreras existentes, en los afloramientos de roca y en los testigos de sondeos. Si los conocimientos cualitativos indican que la roca puede ser susceptible de meteorización y degradación, deben realizarse ensayos de durabilidad y físico-químicos en laboratorio, así como para los materiales de drenaje.

Los criterios de durabilidad dependen de las necesidades particulares del diseño. Los materiales más duros son apropiados para el drenaje y donde se necesite mantener sus características a largo plazo. Campbell (1986) estudió los efectos de un aumento de tensiones en la porosidad de estériles gruesos. Vandre (1993) propuso una serie de especificaciones para los estériles utilizados en el recubrimiento del talud por sus características a largo plazo utilizando ensayos de gravedad específica, absorción y resistencia a compresión.

La degradación de los estériles está muy influenciada por los cambios de temperatura y humedad. Estos parámetros no suelen fluctuar de manera importante según se aumenta la profundidad de la escombrera. La construcción de la escombrera en capas relativamente finas es recomendable para materiales blandos y suele estar controlada por la proporción de finos presente.

2.9. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

Será necesario estimar la conductividad hidráulica de los materiales de la escombrera para los análisis de filtración y el conocimiento del drenaje interno. Asimismo, la conductividad hidráulica sirve para conocer las condiciones piezométricas en el interior de la escombrera que pueden conducir a la inestabilidad.

Debido, principalmente, a la segregación natural de los materiales de la escombrera durante la construcción y a la diferencia de compactación en diferentes zonas de la misma, se produce una amplia variación de la conductividad hidráulica, dependiendo de la localización y dirección del punto de control dentro de la escombrera.

La conductividad hidráulica puede variar también con el tiempo debido a la migración de finos o a la meteorización de los materiales de la escombrera. Por tanto, los programas de ensayos en laboratorio o *in situ* que proporcionan datos exactos de la conductividad hidráulica, normalmente, no son efectivos y no se suelen realizar.

Las estimaciones preliminares de la conductividad hidráulica están, generalmente, basadas en correlaciones empíricas con la granulometría. Donde las escombreras contienen componentes con gran cantidad de finos, o materiales propensos a la degradación, las estimaciones de conductividad hidráulica realizadas deben estar basadas en ensayos con permeámetros de compactación realizados en la fracción fina del material.

También se puede estudiar la influencia que tiene sobre la permeabilidad, k , la posible variación de la relación de vacíos, e , y la granulometría media, D_{50} , dando como resultado el siguiente modelo de regresión:

$$k \text{ fi } 393 \cdot e^{3,631} \cdot D_{50}^{1,311}$$

Tipos de estériles mineros y sus propiedades

Teniendo en cuenta que esta expresión se refiere a estériles de grano grueso, para los estériles de grano fino la fórmula se ve modificada como sigue:

$$k \text{ fi } 2033 \cdot e^{3,486} \cdot D_{50}^{1,235}$$

Por lo tanto, las propiedades hidráulicas de los estériles son muy variables, apareciendo valores entre 10^{-2} m/s, para estériles ígneos y metamórficos, y 10^{-9} m/s para materiales arcillosos. La distinción entre estériles que se comportan como un suelo y como una roca señala una separación entre materiales de baja y alta permeabilidad, respectivamente.

En la Tabla 2.5 se muestran los valores de la conductividad hidráulica saturada medida en estériles arenosos en las zonas de British Columbia (BC), Reino Unido (UK) y Apalaches.

TABLA 2.5. Valores típicos de la conductividad hidráulica.

LOCALIZACIÓN	REFERENCIA	MATERIAL	k (cm/s)	TIPO DE ENSAYO
Escombreras de carbón y metálicas de BC	Dawson & Morgenstern (1995)	Estériles rocosos superficiales	$3 \times 10^{-2} - 3 \times 10^{-4}$	Infiltración superficial
Escombreras de carbón de BC	HBT AGRA (1994)	Estériles de carbón	4×10^{-4}	Ensayos <i>in situ</i>
Escombreras de UK	Thomson & Rodin (1972)	Estériles gruesos superficiales	$1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-4}$	Ensayos <i>in situ</i> y de laboratorio
Canteras de UK	Charles et al. (1977)	Fragmentos de arenisca	$> 1 \times 10^{-2}$	Sondeos <i>in situ</i>
Escombreras de los Apalaches	Shakoor & Ruof (1989)	Estériles superficiales	$1 \times 10^{-3} - 3 \times 10^{-6}$	Ensayos de laboratorio

Fuente: Smith et al. (1995).

Para materiales saturados, la conductividad hidráulica varía entre 10^{-6} m/s y 10^{-4} m/s, disminuyendo este valor al disminuir la relación de vacíos.

Vandre (1995) ha estudiado los estériles de minas metálicas del oeste de EE.UU. realizando una gran cantidad de ensayos de infiltración cuyos resultados se pueden observar en la Fig. 2.8. Estos resultados muestran que para materiales situados bajo el límite de separación entre estériles arenosos y rocosos (30 %) la infiltración es mayor que 1 cm/s.

Por lo tanto, un contenido del 20 % - 30 % de arenas puede ser el valor que limite el comportamiento de los estériles como un suelo o como una roca. Los ensayos de conductividad hidráulica saturada sobre estériles arenosos no cohesivos dan valores variables entre 10^{-6} y 10^{-4} cm/s.

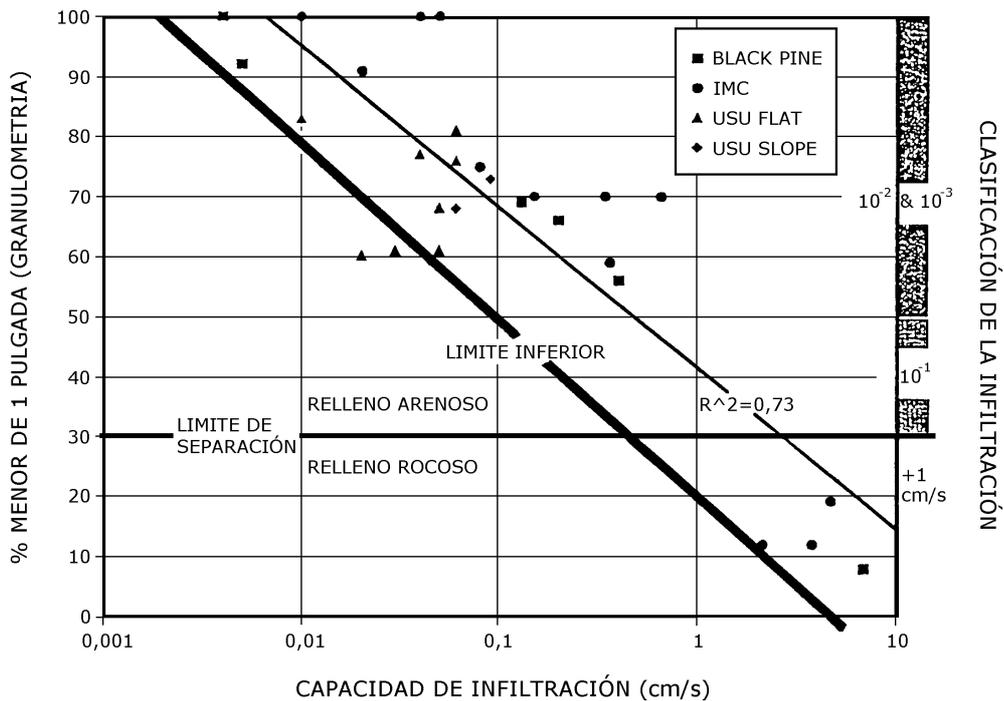


Figura 2.8. Datos de infiltración superficial (Smith et al., 1995).

2.10. CONSOLIDACIÓN Y ASENTAMIENTO

Los procesos de consolidación y asentamiento que las escombreras sufren durante y después de su construcción, influyen en la densidad y en las características de resistencia al corte de los materiales de dichas estructuras. Dependiendo de las técnicas de construcción, las distintas zonas del interior de las escombreras pueden sufrir diferentes esfuerzos de compactación.

Las características de los asentamientos pueden variar, produciéndose asentamientos diferenciales en el tiempo y su consecuente rotura, la cual puede conducir a la rotura de la superficie de drenaje, terrenos de recubrimiento, etc., además de grandes infiltraciones en la escombrera.

Debido a la granulometría, frecuentemente gruesa de la mayoría de los estériles de mina, los ensayos de compactación en laboratorio son difíciles, y los resultados, generalmente, no son representativos. Por eso, no se suelen realizar ensayos de compactación ni ensayos de densidad. Las estimaciones preliminares de la densidad de los materiales de la escombrera están, normalmente, basadas en factores de esponjamiento conocidos, tolerantes con la consolidación y los asentamientos. Los factores de esponjamiento se encuentran en un rango entre 1,2 y 1,5, dependiendo de los tipos de material, métodos de construcción de la escombrera, etc.

2.11. CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

Las propiedades geoquímicas de los estériles pueden tener un impacto medioambiental significativo. Las aguas subterráneas y superficiales que circulan a través y sobre los materiales pueden arrastrar elementos

Tipos de estériles mineros y sus propiedades

contaminantes, tales como metales pesados. Además, los problemas de acidez son muy frecuentes en algunas escombreras, principalmente de pirita.

La composición química de los estériles es muy variable según la explotación minera de que se trate, ya que no sólo depende de la naturaleza litológica de los propios materiales extraídos, sino también del método de tratamiento y vertido, de las condiciones climatológicas y de las reacciones de meteorización que se desarrollan dentro de los depósitos.

La composición química de los materiales puede variar tanto vertical como horizontalmente debido a cambios en la calidad de los estériles, cambios en las leyes de corte por las fluctuaciones del mercado y por cambios en los procesos mineralúrgicos de concentración, meteorización y lixiviación.

Muchos residuos mineros tienen en su composición metales que, aun estando presentes en pequeñas cantidades, son tóxicos para las plantas, el hombre y los animales, y el grado de contaminación producido por las aguas superficiales de escorrentía y lixiviados puede llegar a ser muy alto.

La mayoría de los estériles presentan deficiencias de nutrientes. Así, las concentraciones de nitrógeno son inadecuadas para el crecimiento de las plantas, los niveles de fósforo son, generalmente, muy bajos y suelen aparecer deficiencias de potasio, calcio y magnesio.

En determinadas ocasiones se produce un incremento de la salinidad debido a la interacción de los productos de oxidación de la pirita y los carbonatos nativos, por concentración de sales en los estériles como consecuencia del reciclado del agua, por adición de sustancias a los lodos de las plantas mineras para ajustar el pH de los efluentes, o por excesiva evaporación de la superficie. Todos estos procesos se ven acentuados al unirse a los reactivos y correctores de pH que se utilizan en los tratamientos mineralúrgicos.

Es muy importante considerar la formación de ácidos a partir de estériles sulfurosos. Si aparece un drenaje ácido, se deberán establecer ciertas medidas de mitigación, que se podrán clasificar en medidas de control de la fuente y medidas de control de la migración.

La interceptación y tratamiento del ácido de una escombrera representa un coste a largo plazo muy importante. La generación de ácido y su migración puede ser minimizada con un sellado que evite la entrada de oxígeno y agua tanto como sea posible. Por ejemplo, suelos cubiertos con materiales de permeabilidad baja de 10^{-6} cm/s pueden reducir la generación de ácido en más de un 90 %. Knapp, Schaver, Pettit et al. (1992) describieron el *Reactive Acid Tailings Assessment Program* (RATAP) y relacionaron los resultados con las medidas en campo de la generación de ácido de estériles de mina sulfurosos.

La difusión de oxígeno a través de un suelo compactado se puede modelizar a partir de ensayos en laboratorio, teniendo en cuenta que están muy afectados por el contenido de humedad.

El modelo RATAP considera la generación de ácido a partir de partículas finas y gruesas de forma independiente. La oxidación de la pirita produce la degradación y fracturación de las partículas más grandes. La producción de ácido aumenta con el contenido de finos y se mantiene durante más tiempo. La temperatura interna de la escombrera también afecta a la formación de ácido, que es una reacción exotérmica. El modelo RATAP tiene en cuenta las variaciones de temperatura basándose en medidas en campo.

El transporte de oxígeno a través de la escombrera se modeliza basándose en la cantidad de huecos

existentes y al contenido de humedad estimado para los estériles, además de los ensayos de laboratorio relativos a la difusividad y permeabilidad de los materiales.

En la Fig. 2.9 se recogen los resultados del estudio de varias muestras con diferentes grados de compactación.

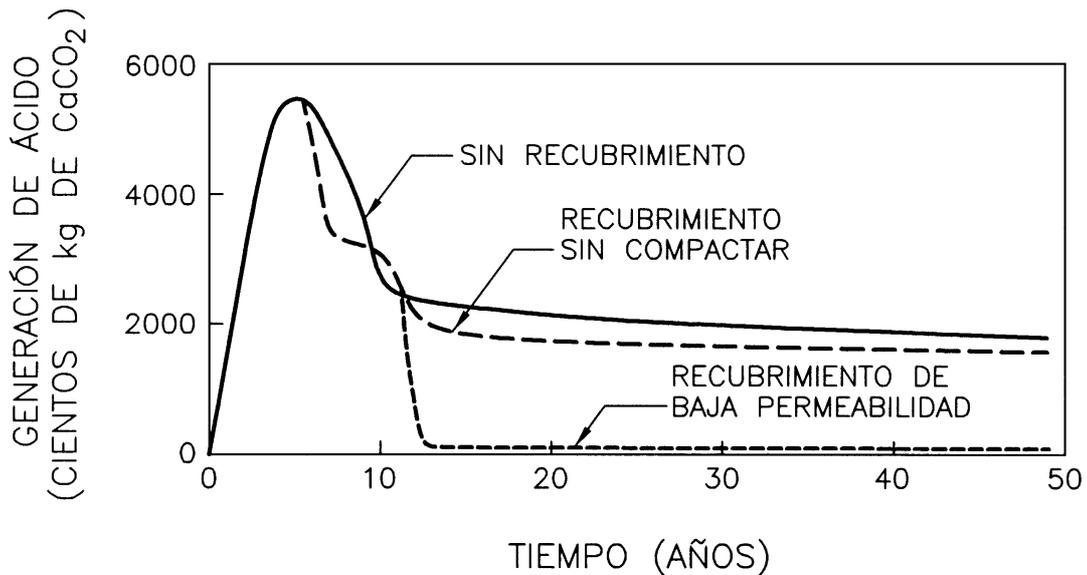


Figura 2.9. Generación de ácido para diferentes grado de compactación (Marcus, J.J., 1997).

El aspecto más importante será la selección de parámetros reales y conservadores, los cuales actuarán sobre las propiedades de los estériles y del suelo, modificándolas a largo plazo. La disminución de la producción de ácido es muy lenta y puede ser acelerada si el recubrimiento es tratado adecuadamente. Por lo tanto, el cuidado y mantenimiento del sistema de recubrimiento se debe considerar a muy largo plazo.

Los análisis químicos en laboratorio del material utilizado son necesarios para cumplir con los permisos pertinentes. Los ensayos normalmente utilizados son la columna de filtración y la determinación de ácido-base. Además, dependiendo de la mineralogía de la mena y de la roca encajante, pueden ser necesarios ensayos para determinar elementos contaminantes específicos.

2.12. METODOLOGÍA DE REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS

La naturaleza generalmente gruesa e incoherente de los estériles plantea numerosos problemas en los reconocimientos y ensayos geotécnicos. Por un lado, los sondeos de reducido diámetro ($\varnothing < 140$ mm) impiden extraer bloques o gravas gruesas mientras que, por otro, los materiales lajosos o deleznales son fragmentados con facilidad por las coronas de perforación, que producen una modificación de la granulometría natural. Además, la adición de agua en la perforación satura los finos cohesivos o arrastra los no cohesivos.

Tipos de estériles mineros y sus propiedades

Estos problemas se pueden solucionar mediante la excavación previa de pozos de reconocimiento.

Los sondeos deben tener unas dimensiones proporcionales al tamaño del bloque máximo, recomendándose, en general, una relación de 5 a 1 como mínimo, es decir, que con bloques de 0,30 m el diámetro del pozo debe ser de 1,50 m, con una profundidad del mismo orden. Estos sondeos también pueden ser utilizados para conocer otras propiedades distintas a la granulometría, como el peso específico o composición.

Existe una gran variedad de estériles de mina por lo que respecta a su naturaleza, tamaño, granulometría, etc., incluso dentro de una misma explotación, y que, normalmente, tienen escasa relación con el mineral explotado.

En general, los estériles son de tamaño apreciable (5-30 cm), por lo que aparecen grandes problemas para la determinación de propiedades geotécnicas, como en el caso de gravas y escolleras. Por ello, es necesario recortar tamaños gruesos para utilizar las técnicas de ensayo habituales. En este proceso se pueden distinguir tres modalidades:

- S Recorte por encima de una dimensión dada D y reconstrucción de una muestra semejante geoméricamente, en la relación D_{\max}/D . Este método es válido conservando el mismo índice de huecos y siempre que el material tenga pocos finos ($< 15\%$), lo que implica un comportamiento regular.
- S Recorte por encima de una dimensión dada D , de forma que el porcentaje de elementos superiores a D no supere el 15-25 %. Esta técnica exige aproximar correctamente el peso específico de la muestra en función del valor original.
- S Recorte por la dimensión D y sustitución por un porcentaje equivalente de arena y gravilla igual al existente entre D y D_{\max} . Este método mantiene la resistencia al corte pero altera otras propiedades.

Parece conveniente mantener una relación mínima de 8 a 10 entre el tamaño de la probeta de ensayo y la máxima dimensión de las partículas.

En cuanto a las características de los materiales se puede observar que, en general, la forma de los estériles varía desde la casi cúbica de los bloques de cuarcita o caliza, a la subredondeada de las areniscas y a la lajosa de los esquistos y pizarras; la granulometría va a depender de los procesos de extracción junto a la segregación en el proceso de vertido, por lo que será muy difícil conocer a priori la granulometría a obtener, mientras que la resistencia al corte se enfrenta al tamaño apuntado, limitándose las secciones de ensayo de corte a $30 \times 30 \text{ cm}^2$ y triaxiales de diámetros inferiores a 150 mm.

En la mayoría de los casos se puede recurrir a observar los taludes de escombreras similares o a adoptar valores estimativos. Salvo determinaciones precisas no podrá contarse con ningún tipo de cohesión en los estériles, si bien se sabe que existen efectos capilares o electroquímicos que generan resistencias cohesivas en los mismos.

En general, se debe tener en cuenta que el ángulo de rozamiento interno efectivo aumenta con la angulosidad de las partículas, el tamaño de las mismas, la graduación granulométrica y la compactación de vertido, y disminuye con las tensiones efectivas, el contenido de finos arcillosos y la alteración de las rocas.

Para estimar el ángulo de rozamiento pueden adoptarse los valores típicos obtenidos por aplicación de la Tabla 2.6.

TABLA 2.6. Estimación del ángulo de rozamiento.

$B' = (M + B'_1 + B'_2 + B'_3 + B'_4) \cdot \alpha$			
Naturaleza	M	Silíceas Carbonatada Esquistosa Arcillosa	36° 34° 32° 30°
Compacidad	B' ₁	Suelta Media Compacta	-5° 0° +5°
Forma y rugosidad	B' ₂	Angulosa Media Lajosa Redondeada Muy redondeada	+2° 0° -1° -2° -3°
Tamaño	B' ₃	Arena Grava fina Grava gruesa Bloques, bolos	0° 1° 2° 3°
Granulometría	B' ₄	Uniforme Media Extendida	-3° 0° +3°
Nivel de tensiones (altura de escombros)	α	Bajo (H<20 m) Medio (20 m<H<40 m) Alto (H>40 m)	1,1 1,0 0,9

Fuente: I.T.G.E. (1986).

La deformabilidad de los estériles puede estudiarse en moldes de gran diámetro, cargas de gran superficie, etc. En laboratorio es difícil disponer de células edométricas de más de 30 cm de diámetro, por lo que, en muchos casos, serán simples estimaciones. La deformabilidad está relacionada con la forma de vertido, la humedad presente en la colocación, la granulometría del material y la alterabilidad y degradación del mismo.

La compresibilidad de las escombreras debe ser alta debido a su propio peso, produciéndose asientos considerables por saturación o infiltración. Aunque las medidas son muy escasas, los asientos finales pueden ser del 0,5 % al 3 % de la altura, con un valor medio del 1,5 %, produciéndose la mayor parte de los mismos en un período de 5 a 10 años. Por otro lado, en los asientos durante la formación de la escombrera que determinan la capacidad de la misma, tiene gran importancia la compactación producida por los equipos de transporte y la humedad de las distintas tongadas. Las escombreras muy secas pueden tener asientos muy importantes y bruscos si se saturan repentinamente. En la Tabla 2.7 se indican el porcentaje de asiento en función de la altura H.

TABLA 2.7. Estimación del asentamiento.

	S (% H)
Escombros gruesos vertidos	6-8
Escombros bien graduados vertidos	3-5
Id. regados	2-3
Escombros bien graduados compactados	1-2
Id. bien regados	0,5-1

Fuente: I.T.G.E. (1986).

Esta compresibilidad se debe, por un lado, al elevado índice de poros (0,8-1,5) de los materiales vertidos y, por otro, a la migración de finos, colapso de los contactos entre bloques, degradación por alteración, etc. En el caso del carbón tienen importancia, además, los fenómenos de combustión espontánea y la calcinación de los escombros calizos.

Estos procesos van aumentando con la altura de la escollera, produciéndose simultáneamente una densificación de aspecto parabólico. El proceso de reducción de volumen viene acompañado de la creación de sobrepresiones intersticiales que pueden dar lugar a fenómenos de inestabilidad, especialmente si las condiciones de drenaje son deficientes.

2.13. RELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS DE LOS ESTÉRILES

Aunque las condiciones de cada explotación se diferencia de cualquier otra, se pueden establecer una serie de relaciones generales entre los diferentes parámetros y las observaciones *in situ* para el estudio de problemas de inestabilidad particulares. No serán relaciones específicas de causa-efecto, pero serán útiles como orientaciones para conseguir la estabilidad de los taludes.

A partir del estudio de una serie de escombreras de EE.UU. se puede observar que la altura de la escombrera y el porcentaje de tierra y cantidad de roca deleznable están racionalmente bien relacionados con la estabilidad de la escombrera, Fig. 2.10.

Como se observa en dicha figura, cuando la profundidad de la excavación supera los 18 m, las escombreras con más del 40 % de tierra y roca deleznable frecuentemente presentan problemas de estabilidad. Cuando la cantidad de tierra oscila entre el 20 % y el 40 %, la rotura del talud es menos frecuente o menos grave. Las escombreras formadas principalmente de roca (menos del 20 % de tierra) presentan una menor probabilidad de inestabilidad.

Los porcentajes relativos de tierra y roca del recubrimiento también pueden relacionarse con los resultados de los ensayos de resistencia al corte de los estériles, como se muestra en la Fig. 2.11.

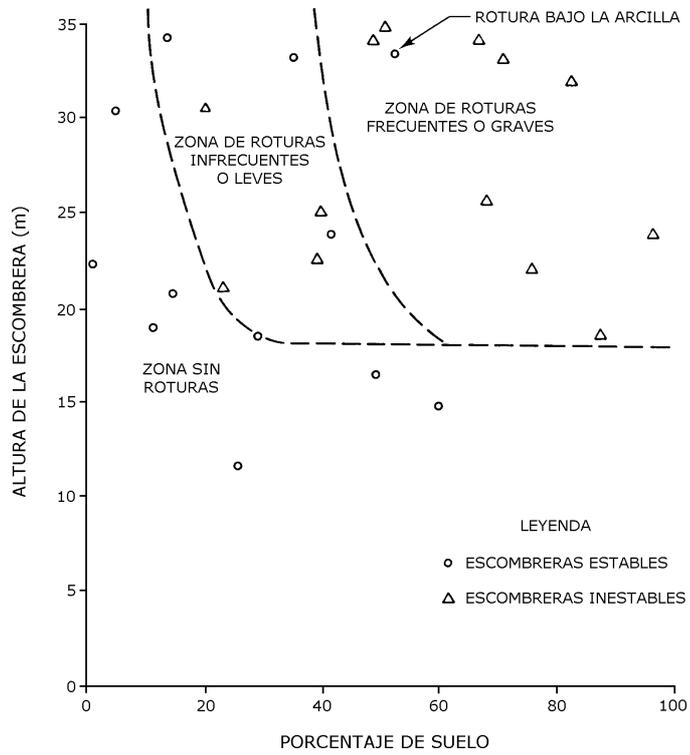


Figura 2.10. Efecto de la altura y del porcentaje de tierra sobre la estabilidad (Douglas, P.M. y Bailey, M.J., 1982).

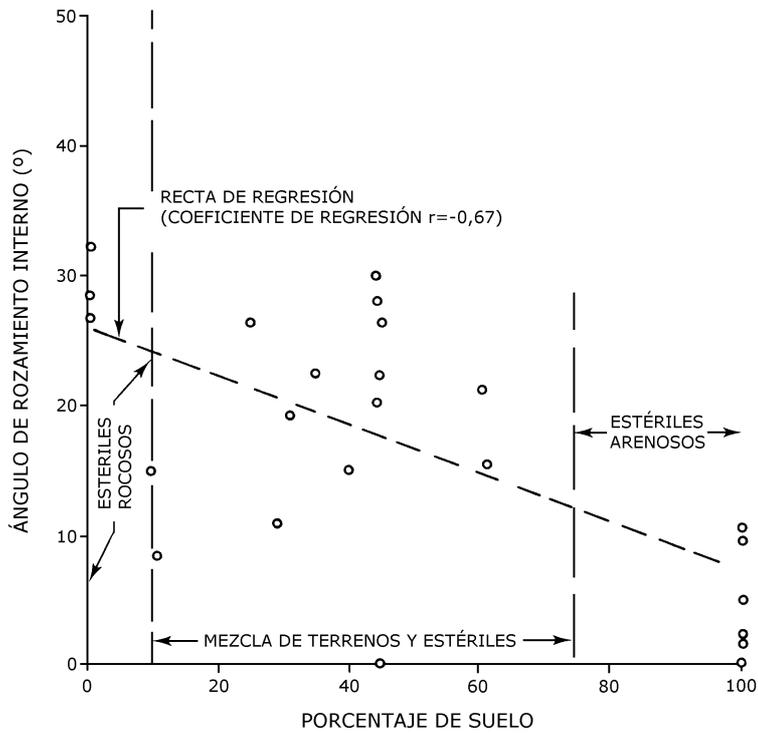


Figura 2.11. Ángulo de rozamiento interno de los estériles vs. contenido de tierra (Douglas, P.M. y Bailey, M.J., 1982).

Tipos de estériles mineros y sus propiedades

Aunque los datos son demasiado dispersos como para obtener una buena relación lineal, se puede establecer una separación de los resultados en tres categorías según sus propiedades resistentes: estériles rocosos, estériles mixtos y estériles arenosos. Sus propiedades se pueden observar en la Tabla 2.8.

TABLA 2.8. Propiedades generales de los diferentes tipos de estériles.

TIPO DE ESTÉRIL	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	DENSIDAD SECA (kg/m^3)	ÁNGULO DE ROZAMIENTO INTERNO ($^\circ$)	COHESIÓN (kPa)	ÍNDICE DE PLASTICIDAD
Arenoso	13 - 37	1380 - 1750	0 - 10	9,6 - 95,8	12 - 30
Mixto	9 - 19	1310 - 2070	4 - 30	19,1 - 134	14 - 32
Rocoso	5 - 15	1440 - 1910	27 - 32	28,7 - 47,9	14 - 20

Fuente: Douglas, P.M. y Bailey, M.J., 1982.

Los parámetros de resistencia al corte de los estériles también se pueden relacionar con la humedad y la densidad de los mismos. La Fig. 2.12 muestra la relación observada entre el ángulo de rozamiento interno y el contenido de agua de los estériles.

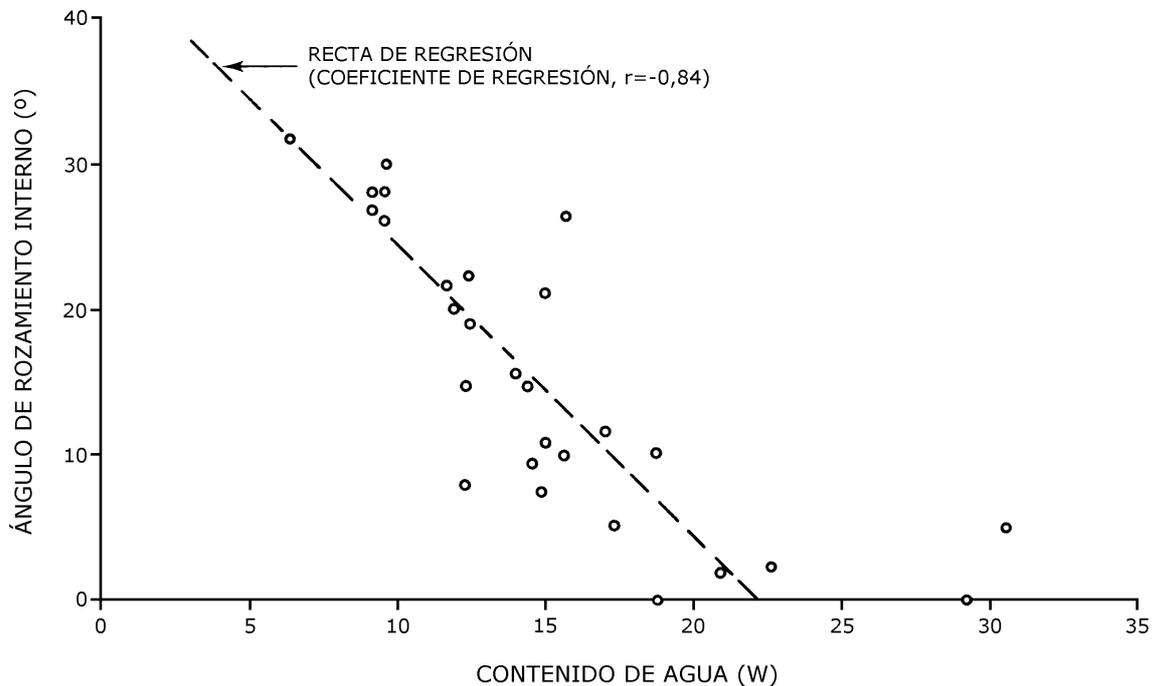


Figura 2.12. Ángulo de rozamiento interno vs. contenido de agua (Douglas, P.M. y Bailey, M.J., 1982).

También existe una posible correspondencia entre la cohesión de los materiales estériles y la densidad *in situ*, que se observa en la Fig. 2.13, donde la densidad se expresa como un porcentaje del valor obtenido en el ensayo de compactación Proctor estándar.

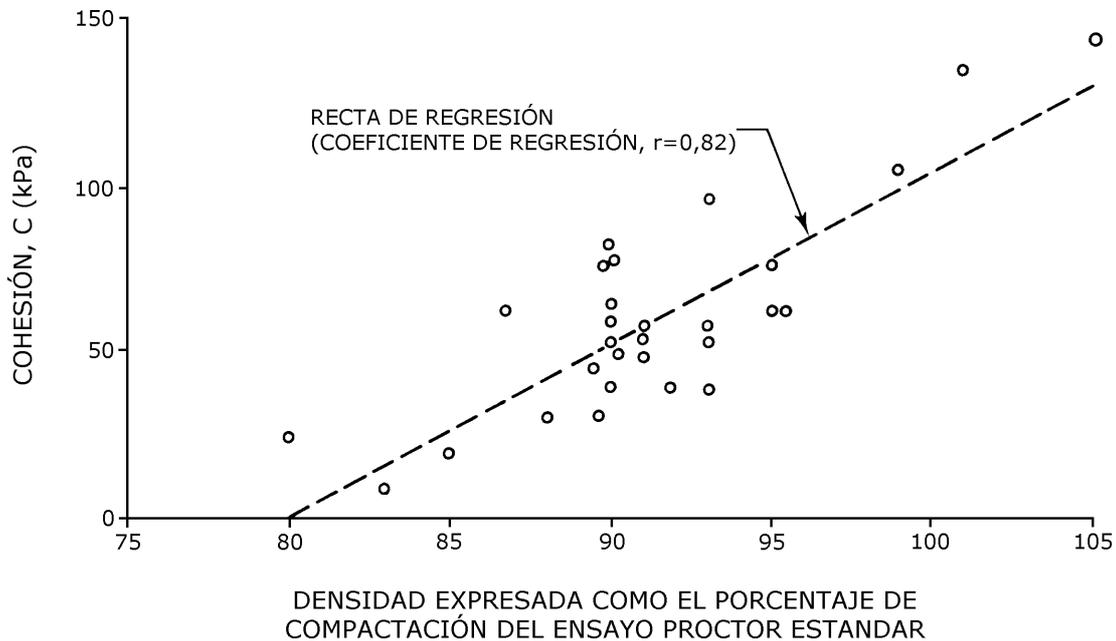


Figura 2.13. Cohesión vs. densidad de los estériles (Douglas, P.M. y Bailey, M.J., 1982).

El comportamiento de los estériles también puede ser caracterizado por la relación entre los resultados obtenidos en el ensayo Proctor estándar con el contenido óptimo de humedad, y el contenido de agua de los estériles *in situ*, de forma que los estériles arenosos presentan una humedad mayor que la óptima y los estériles mixtos y rocosos tienen una humedad más cercana a la óptima o incluso menor. Esto se traduce en que los estériles mixtos y rocosos obtendrán un mayor grado de compactación que los estériles arenosos, por lo que las operaciones normales de mina generarán un mayor grado de compactación y una mayor resistencia al corte en estos materiales, mientras que los esfuerzos adicionales de compactación aplicados a estériles arenosos prácticamente no tienen efecto.

La relación entre los constituyentes del recubrimiento y la estabilidad también se corresponde con la densidad de los estériles.

Mientras el diseño no sea muy específico y no se tengan herramientas de análisis, estas relaciones empíricas serán muy útiles para estudiar las condiciones de estabilidad. El entendimiento de las características de los estériles y sus posibles variaciones determinarán la importancia relativa de los distintos factores en la estabilidad.

2.14. HIDROESTRATIGRAFÍA DE ESCOMBRERAS

Las características hidroestratigráficas de las escombreras se pueden clasificar, de forma general, en una serie de categorías dependiendo del tipo material que se explote y de las características del medio que la rodea. Así, las escombreras de explotaciones de carbón pueden distinguirse de las escombreras de minerales metálicos por su mayor contenido de rocas de baja resistencia (esquistos), mientras que escombreras de

Tipos de estériles mineros y sus propiedades

carbón situadas en distintos emplazamientos se pueden diferenciar por su proporción de rocas de alta resistencia (arenisca) o por la presencia de bentonita que produzca hinchamientos.

Las escombreras formadas por el recubrimiento del terreno en explotación no siempre están presentes de forma independiente, ya que estos materiales pueden estar mezclados con los propios estériles de mina.

Existen muchos factores que pueden afectar al flujo de agua que atraviesa una escombrera, Fig. 2.14. Varios factores físicos que aparecen en esta figura están influenciados por la estratigrafía interna de la escombrera.



SECCIÓN DE UNA ESCOMBRERA

Figura 2.14. Factores que afectan a la hidrología de una escombrera (Whiting, 1981).

El estudio de la influencia de la hidroestratigrafía en el comportamiento relativo a las infiltraciones internas de las escombreras, se puede realizar a partir del análisis de los siguientes aspectos:

S Canalizaciones

La presencia de canalizaciones es muy importante para el control del flujo que atraviesa una escombrera. Según estudios realizados por ElBoushi (1975) la canalización es más importante en partículas de granulometría mayor de 1-2 mm. Los resultados de ensayos de infiltración en escombreras de grano grueso muestran que el agua vertida en superficie fue canalizada a través del 15-20 % de las rocas en profundidades mayores de 1 m.

Campbell (1986) describe los resultados del control de un drenaje realizado bajo una escombrera de 50 m de altura, Fig. 2.15, indicando que el flujo disminuye con el aumento del espesor de la capa de estériles situada sobre el drenaje.

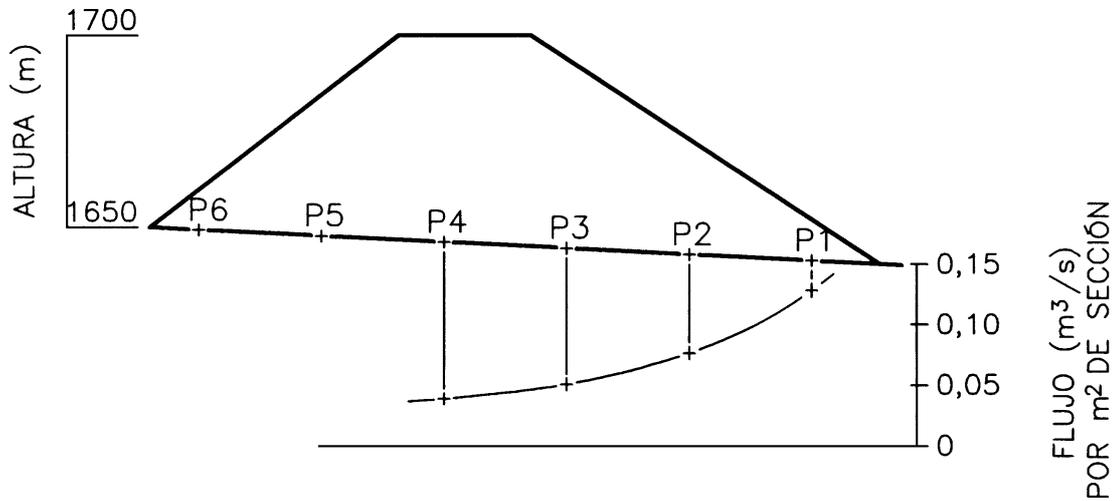


Figura 2.15. Medida de la capacidad de un drenaje rocoso (Campbell, 1986).

S Segregación

Como ya se ha comentado, la superficie final de vertido de una escombrera puede presentar una segregación debido a la rodadura de los materiales más gruesos (guijarros y cantos rodados) hasta el pie del talud, mientras los granos más finos (arenas y gravas) se quedan cerca de la cresta del mismo. Esta segregación produce una estratigrafía muy clara.

Se ha comprobado que, a medida que el tamaño de grano medio de los vertidos disminuye, la zona de acumulación de los granos más gruesos sigue apareciendo, mientras que la zona de tamaños finos no está tan limitada, distribuyéndose a lo largo de todo el talud. Por lo tanto, la segregación es función de la granulometría y, como consecuencia, se puede deducir que, durante el vertido de materiales finos, aparece una capa de material capaz de retener una cantidad de humedad suficiente como para formar una zona de escasa estabilidad.

En sentido hidroestratigráfico, las escombreras se pueden dividir en dos tipos según el método de vertido utilizado. Si los estériles se vierten en capas, se forma una escombrera en la que no aparece segregación granulométrica y donde las filtraciones dependen de la presencia de poros o canalizaciones según la granulometría de los materiales, Fig. 2.16.

Si los estériles son de tamaño grueso, el flujo se determina por las canalizaciones, por lo que las filtraciones se producen en un período corto de tiempo pero sin influir en la elevación del nivel freático a no ser que la base impida el flujo de agua.

Si los estériles presentan tamaños finos, el flujo vendrá determinado por la presencia de poros, pudiéndose elevar el nivel freático en función de la cantidad de filtraciones y de la permeabilidad.

Tipos de estériles mineros y sus propiedades

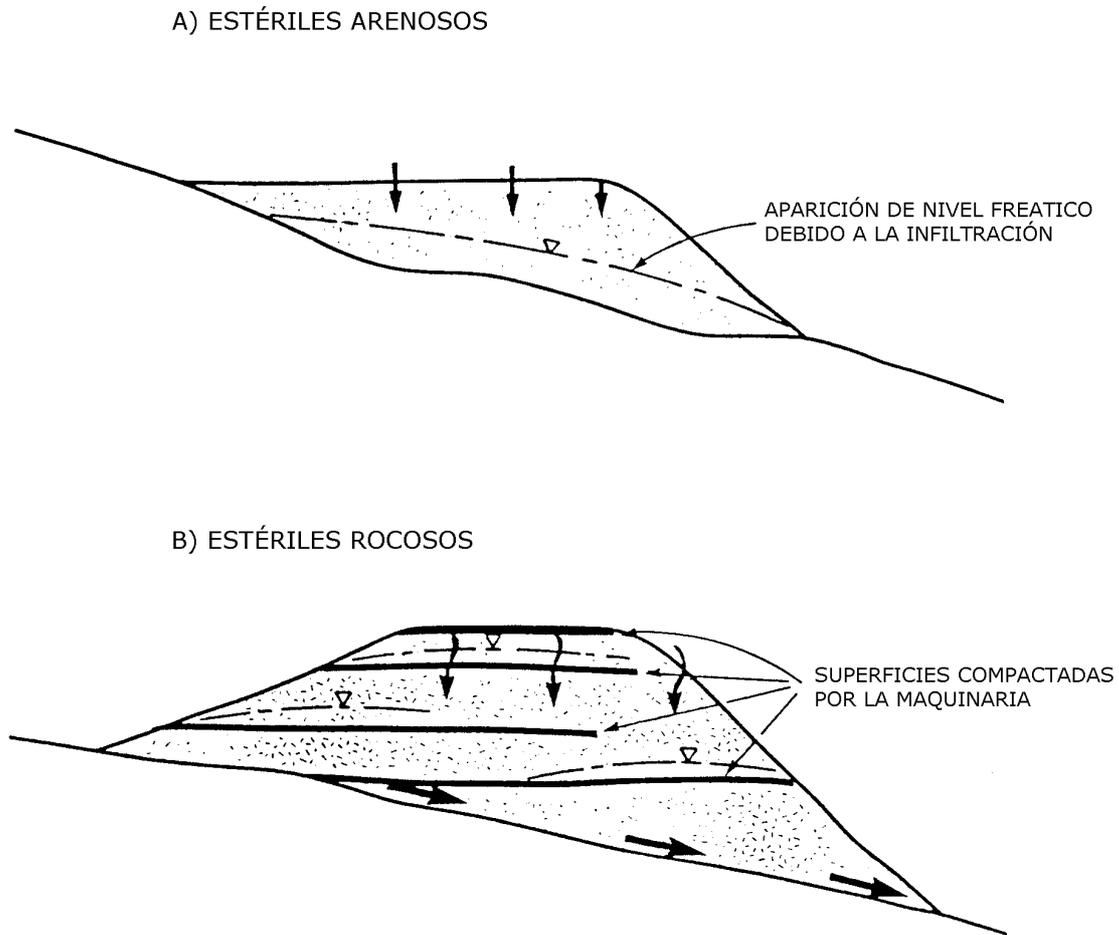


Figura 2.16. Hidroestratigrafía de escombreras sin segregación (Smith et al., 1995).

Por otro lado, si los estériles se vierten formando su ángulo de reposo, se forman escombreras con segregación granulométrica cuya hidroestratigrafía puede observarse en la Fig. 2.17. Este tipo de escombrera presenta una estratigrafía en sentido vertical diferenciando los granos gruesos en el pie del talud y los granos más finos en su cresta. La extensión de la capa fina en el talud depende de la composición del material y de la altura de la escombrera, pero se suele admitir un tercio de la altura total de la escombrera.

Las zonas compactadas de estas escombreras muestran permeabilidades menores que el material superficial, por lo que el flujo está controlado por las filtraciones en taludes de estériles rocosos de grano grueso dispuestos con su ángulo de reposo.

S Nivel freático

A partir de diversos estudios realizados por Morin (1991), se han obtenido las siguientes condiciones por las que puede aparecer un nivel freático en una escombrera:

- Infiltraciones a través de la base de la escombrera debido a su colocación sobre una zona de descarga de aguas subterráneas.

- Infiltraciones producidas por la obstrucción por precipitación química o por sedimentación de finos de las canalizaciones de estériles rocosos.
- Aparición de un nivel freático debido al contacto entre una escombrera de estériles arenosos y la superficie.
- Aparición de un nivel freático en una capa compactada.
- Aparición de un nivel freático en capas de materiales de grano fino paralelas a la superficie de vertido.

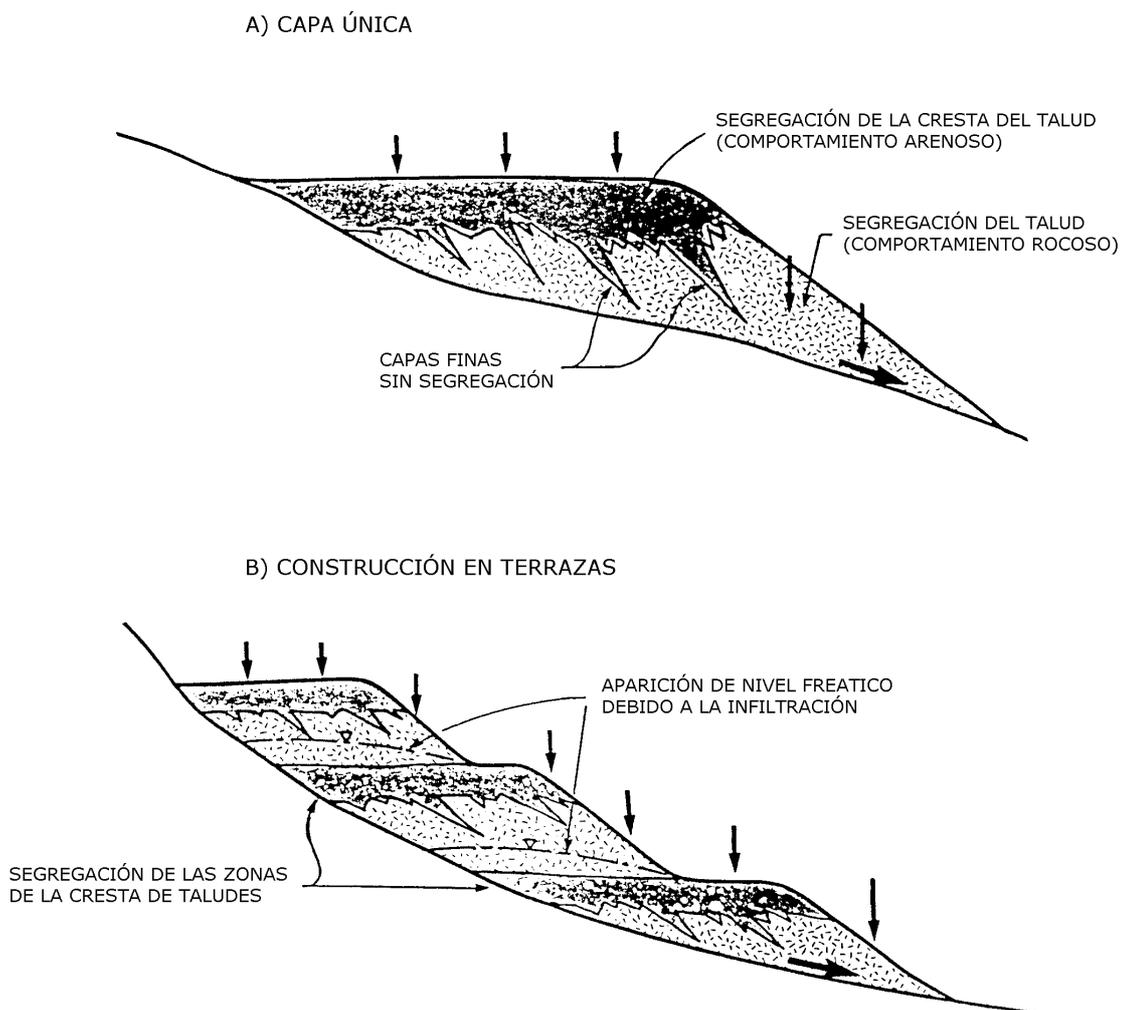


Figura 2.17. Hidroestratigrafía de escombreras con segregación (Smith et al., 1995).

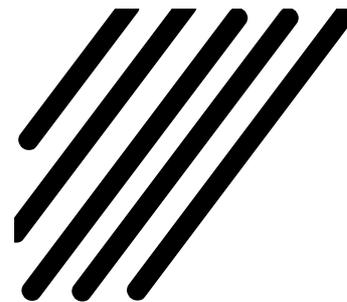
S Meteorización

La meteorización es, normalmente, más importante en estériles cohesivos, donde los fragmentos sean susceptibles de rotura, dando lugar a granos del tamaño de sus partículas constituyentes (arcillas y limos). La meteorización física de estériles arenosos no cohesivos es un proceso que tiene lugar en materiales confinados a profundidades de 1,5-2 m bajo la superficie de la escombrera.

Tipos de estériles mineros y sus propiedades

2.1.	INTRODUCCIÓN	2-1
2.2.	CLASES DE ESTÉRILES MINEROS	2-1
2.3.	GRANULOMETRÍA	2-3
2.4.	PLASTICIDAD DE LOS FINOS	2-6
2.5.	RESISTENCIA INTACTA	2-6
2.6.	RESISTENCIA AL CORTE	2-7
2.7.	MINERALOGÍA Y PETROGRAFÍA	2-14
2.8.	DURABILIDAD	2-14
2.9.	CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	2-15
2.10.	CONSOLIDACIÓN Y ASENTAMIENTO	2-17
2.11.	CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS	2-17
2.12.	METODOLOGÍA DE REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS	2-19
2.13.	RELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS DE LOS ESTÉRILES	2-22
2.14.	HIDROESTRATIGRAFÍA DE ESCOMBRERAS	2-25

capítulo 3



ELECCIÓN Y PREPARACIÓN DEL EMPLAZAMIENTO

3.1. INTRODUCCIÓN

Las escombreras deben ubicarse con preferencia sobre terrenos llanos o con pendiente moderada, a fin de que se construyan sobre un cimiento firme, estable y poco deformable. Debe evitarse que dentro de la zona de influencia de la escombrera se encuentren viviendas, núcleos urbanos o instalaciones, así como vías de comunicación o redes de servicios.

Se entiende como *zona de influencia* el área que puede ser afectada por: caídas de escombros, deslizamientos globales o parciales, flujos de detritus, etc. Esta zona será mayor cuanto más finos sean los escombros y más elevada sea la pendiente del terreno original, y puede reducirse mediante la construcción de muros o diques de contención, barreras dinámicas, cunetas de recogida, etc.

En este capítulo se describe en primer lugar los factores que influyen en la elección del emplazamiento y la metodología de estudio del lugar elegido.

3.2. LUGAR DE EMPLAZAMIENTO

En la elección del emplazamiento de una escombrera deben considerarse criterios de diversa naturaleza: técnicos, económicos, ambientales, socioeconómicos, etc.

Entre los criterios específicos más importantes se encuentran la distancia de transporte desde la explotación hasta la escombrera, que afecta al coste total de la operación; la capacidad de almacenamiento necesaria, que viene impuesta por el volumen de estériles a mover, las alternativas potenciales que pueden producirse sobre el medio natural y las restricciones ecológicas existentes en el área de implantación.

Independientemente de las razones económicas, debe evitarse implantar las escombreras sobre zonas de eventual explotación subterránea, ya que pueden provocar subsidencias en la superficie del terreno. Debido al riesgo de deslizamientos y desprendimientos, no es aconsejable la ubicación de escombreras sobre cauces o zonas de ribera, salvo que vayan acompañadas de medidas especiales de protección.

Elección y preparación del emplazamiento

La implantación de escombreras en zonas inundadas requiere un relleno previo con materiales gruesos seleccionados, con el fin de conseguir el drenaje adecuado. Las surgencias de agua deben captarse y derivarse del área de la escombrera, procurando que el agua no entre en contacto con los estériles, sobre todo si éstos son tóxicos o radiactivos.

En función del lugar de emplazamiento y de su configuración, las escombreras pueden clasificarse en los siguientes tipos: de vaguada, de ladera, de divisoria, exenta y de relleno de huecos, Fig. 3.1.

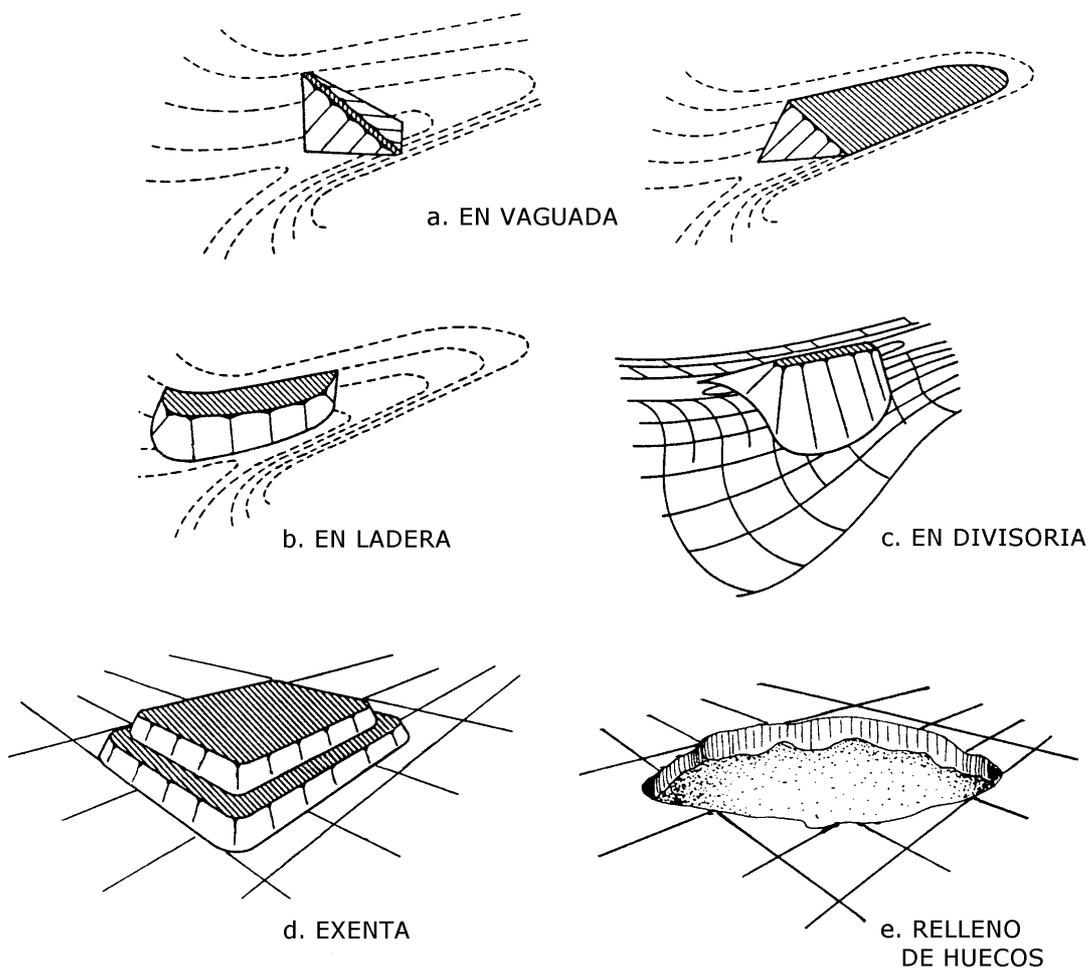


Figura 3.1. Tipos de escombreras según el lugar de emplazamiento.

- **En vaguada.** Pueden rellenar parcial o totalmente un valle o una vaguada, disponiéndose la superficie de la escombrera con una cierta inclinación para evitar la acumulación de agua en la parte superior. En función de las surgencias aguas arriba y dependiendo de la altura de la escombrera, en algunos casos se requiere la colocación de sistemas de drenaje en el interior de las mismas.

- **En ladera.** Cuando la construcción de la escombrera se realiza sobre un terreno con pendiente, sin llegar a bloquear totalmente el drenaje principal. Por lo general, el talud de la escombrera está en función de la inclinación de la superficie del terreno sobre la que se apoya.
- **En divisoria.** Es un caso especial de escombrera en ladera, en el que ésta está emplazada en la cima y queda apoyada sobre ambos lados de la línea divisoria del terreno.
- **Exenta.** La escombrera se construye por apilamiento o amontonamiento de material sobre un terreno llano o con ligera inclinación. Cuando la escombrera alcanza una altura considerable, la construcción se realiza mediante terrazas y bermas.
- **Relleno de huecos.** Debido a la fuerte presión ambiental para la conservación de los terrenos, se está generalizando el relleno con estériles de mina y escombros en antiguos huecos mineros abandonados. Cuando existe la posibilidad de inestabilidad física o química de los materiales que se vayan a depositar en esos huecos, deberán acondicionarse e impermeabilizarse previamente para impedir el movimiento de los lixiviados o efluentes contaminantes.



Foto 3.1. Vertido de estériles dentro de un hueco de corta.

3.3. TAMAÑO Y FORMA. CLASIFICACIÓN DE ESCOMBRERAS

El tamaño de las escombreras está marcado por el volumen de estéril que es preciso mover para la extracción del mineral. En minas a cielo abierto, la cantidad de estériles no depende sólo de la estructura geológica del

Elección y preparación del emplazamiento

yacimiento y de la topografía del área, sino también del valor económico del mineral y de los costes de extracción del estéril. Los ratios o relaciones entre la roca estéril y el mineral, expresados en m^3/t o t/t , son, en la mayoría de las explotaciones de sustancias metálicas y energéticas, muy superiores a la unidad.

Según sea la implantación de la escombrera con respecto a la explotación, éstas se clasifican en **interiores**, si los estériles se depositan dentro de los propios huecos excavados tras la apertura de un hueco inicial, y **exteriores**, cuando la morfología del yacimiento y su consiguiente explotación no permiten el relleno del hueco creado en las primeras fases de la mina, Fig. 3.2.

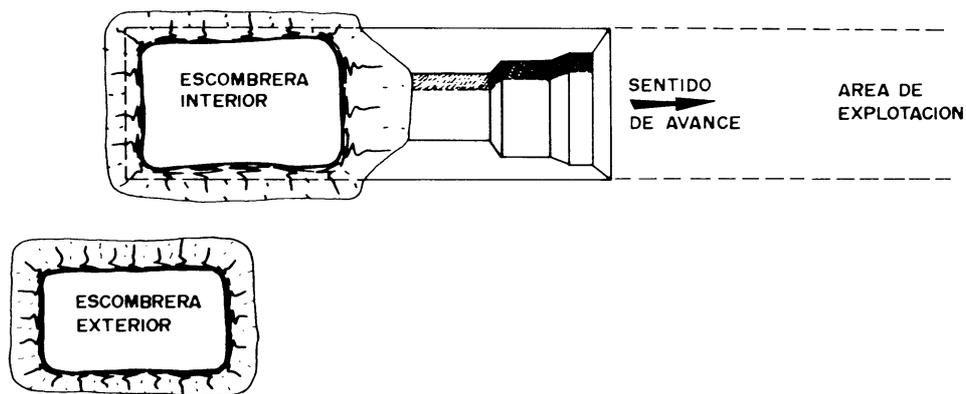


Figura 3.2. Implantación de escombreras en relación al hueco de explotación (López Jimeno, C., 1989).

En función de la extensión que ocupe el emplazamiento, es posible que, en un mismo área, coexistan combinaciones diversas de esas estructuras. Asimismo, la forma de las escombreras depende no sólo de la morfología del terreno, sino incluso de los equipos mineros de transporte y vertido.

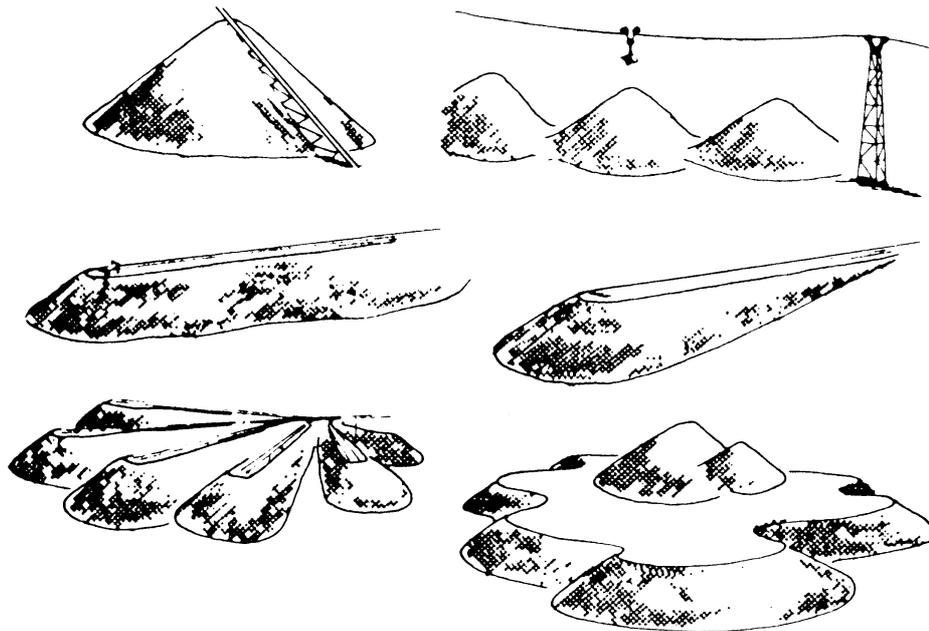


Figura 3.3. Escombreras antiguas construidas con funiculares o mediante vertido con vagoneta.

Antiguamente era habitual el transporte con funiculares y vagonetas con los que se originaban estructuras con formas cónicas y troncocónicas; en la actualidad los sistemas más empleados utilizan volquetes o cintas transportadoras que facilitan el extendido y compactación sistemática, y se adaptan de manera más fácil al diseño final del proyecto.

3.4. GEOLOGÍA Y CAPACIDAD PORTANTE

Al elegir el lugar de asentamiento de una escombrera es preciso realizar una investigación de campo para determinar, mediante muestreo, las características geomecánicas de los materiales que constituirán la base del depósito, así como descartar la existencia de mineral potencialmente explotable en el subsuelo.

En una primera etapa se realizará un reconocimiento visual del terreno para identificar los afloramientos rocosos, la cubierta vegetal, los tipos de suelos, surgencias de agua, áreas de baja permeabilidad, vestigios de hundimientos mineros, discontinuidades estructurales, etc. Toda esta información se reflejará en un plano a escala conveniente.

En la segunda etapa se efectuarán sondeos y calicatas que servirán para conseguir información geológica del subsuelo, así como para obtener muestras para la realización de ensayos *in-situ* o en laboratorio. Los sondeos para reconocimientos se deben realizar a profundidades superiores a los 5 ó 7 m.

Entre los ensayos *in-situ* de los suelos cabe destacar los ensayos de corte directo, ensayos de deformabilidad y ensayos de permeabilidad, mientras que, en laboratorio, se realizan los ensayos de propiedades índice, de compactación, de permeabilidad, de consolidación y de corte directo.

Dependiendo de las dimensiones de la escombrera y de las limitaciones impuestas por el entorno, el número de ensayos a realizar variará, siendo la investigación más completa conforme el riesgo de daños a bienes materiales o personas aumente.

Como mínimo se necesitan conocer tres parámetros básicos, como son: la cohesión, el ángulo de rozamiento interno y el peso específico aparente (seco y saturado), para estimar si la base de una escombrera puede soportar la sobrecarga que supone el peso de los estériles vertidos o si, por el contrario, es probable que se produzcan inestabilidades estructurales y movimientos de los materiales de la base que afecten a la estructura que gravita sobre los mismos.

3.5. METODOLOGÍA PARA LA ELECCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO

La elección del área de implantación de una escombrera persigue diversos objetivos, entre los que caben destacar los siguientes:

- S Minimizar los costes de transporte y vertido.
- S Alcanzar la integración y restauración de la estructura en el entorno.
- S Garantizar el drenaje.
- S Minimizar el área afectada.
- S Evitar la alteración sobre hábitats y especies protegidas.

Elección y preparación del emplazamiento

Como resultado de las restricciones medioambientales y económicas que influyen en el proceso de tratamiento de los residuos mineros, es evidente que se hace necesario llevar a cabo una evaluación exhaustiva de las distintas alternativas de emplazamiento de la escombrera. Los datos necesarios no siempre son sencillos de obtener, pueden ser incompletos o incluso las alternativas pueden ser económicamente irrealizables. Por tanto, existe siempre un grado de incertidumbre que juega un papel importantísimo en el proceso de elección del emplazamiento.

3.5.1. Método del Índice de Calidad

El sistema propuesto por Ayala y Rodríguez (1986) sirve como instrumento de elección preliminar cuando las diversas alternativas existentes para el emplazamiento de la escombrera no resultan lo suficientemente definitivas. El método propuesto pasa por determinar el llamado *índice de calidad* del emplazamiento, Q_e , mediante la siguiente expresión:

$$Q_e = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot f_5$$

Cada uno de los parámetros que definen el índice de calidad son:

A. Factor f_1 de alteración de la capacidad portante del terreno debido al nivel freático. Los valores que puede tomar son los siguientes:

- $f_1 = 1$ Sin nivel freático o con nivel a profundidad superior a 5 m.
- $f_1 = 0,7$ Con nivel freático entre 1,5 y 5 m.
- $f_1 = 0,5$ Con nivel freático a menor profundidad de 0,5 m.
- $f_1 = 0,3$ Con agua socavando menos del 50 % del perímetro de la estructura.
- $f_1 = 0,1$ Con agua socavando más del 50 % del perímetro de la estructura.

B. Factor de resistencia de la cimentación, f_2 . Depende de la naturaleza del cimiento y de la potencia de la capa superior del terreno de apoyo:

TABLA 3.1.

TIPO DE SUELO	POTENCIA				
	< 0,5 m	de 0,5 a 1,5 m	de 1,5 a 3,0 m	de 3,0 m a 8,0 m	> 8 m
Coluvial granular	1	0,95	0,9	0,85	0,8
Coluvial de transición	0,95	0,9	0,85	0,8	0,75
Coluvial limo-arcilloso	0,8	0,8	0,7	0,6	0,5
Aluvial compacto	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7
Aluvial flojo	0,75	0,7	0,6	0,5	0,4

C. Factor topográfico o de pendiente, &. Varía en función de si la implantación se efectúa en terraplén o en ladera y en función de la inclinación de la zona:

TABLA 3.2.

TOPOGRAFÍA DE IMPLANTACIÓN		VALOR DE &
TERRAPLÉN	Inclinación < 1 °	1
	Inclinación entre 1 ° y 5 ° (< 8 %)	0,95
	Inclinación entre 5 ° y 14 ° (de 8 % a 25 %)	0,9
LADERA	Inclinación entre 14 ° y 26 ° (de 25 % a 50 %)	0,7
	Inclinación > 26 ° (> 50 %)	0,4
	Perfil en V cerrada (inclinación de laderas > 20 °)	0,8
	Perfil en V abierta (inclinación de laderas < 20 °)	0,60 - 0,70

D. El factor relativo al entorno humano y material afectados, \$, considera el riesgo de ruina de distintos elementos si se produjera la destrucción de la escombrera:

TABLA 3.3.

ENTORNO AFECTADO	VALOR DE \$
Deshabitado	1
Edificios aislados	1,1
Explotaciones mineras poco importantes	1,1
Servicios	1,2
Explotaciones mineras importantes	1,3
Instalaciones industriales	1,3
Cauces intermitentes	1,2 - 1,4
Carreteras de 1 ° y 2 ° orden, vías de comunicación	1,6
Cauces fluviales permanentes	1,7
Poblaciones	2

E. Factor de alteración de la red de drenaje, †, que viene dado por:

TABLA 3.4.

ALTERACIÓN DE LA RED DE DRENAJE	VALOR DE \dagger
Nula	0
Ligera	0,2
Modificación parcial de la escorrentía de una zona	0,3
Ocupación de un cauce intermitente	0,4
Ocupación de una vaguada con drenaje	0,5
Ocupación de una vaguada sin drenaje	0,6
Ocupación de un cauce permanente con erosión activa menor del 50 % del perímetro de la estructura	0,8
Ocupación de un cauce permanente con erosión activa mayor del 50 % del perímetro de la estructura	0,9

Tras la obtención de los distintos parámetros se puede llegar a calcular cuál es el valor del índice de calidad Q_e . Según el valor obtenido, los emplazamientos se clasifican de acuerdo con:

TABLA 3.5.

VALOR DE Q_e	EMPLAZAMIENTO
$1 < Q_e < 0,90$	Óptimo para cualquier tipo de estructura. Tolerable para estructuras de gran volumen.
$0,90 < Q_e < 0,50$	Adecuado para estructuras de volumen moderado
$0,50 < Q_e < 0,30$	Tolerable
$0,30 < Q_e < 0,15$	Mediocre
$0,15 < Q_e < 0,08$	Malo
$Q_e < 0,08$	Inaceptable

3.5.2. Método de las Funciones de Utilidad

La técnica de evaluación más empleada en estos proyectos es, por su sencillez, la que se basa en el *análisis de decisiones con objetivos múltiples*. Este método, de gran aplicación en ingeniería, requiere el empleo y definición de funciones de utilidad multiatributos para la valoración de los diferentes objetivos implicados en la toma de decisiones.

Según Keeney (1982), las etapas que se deberían seguir en toda metodología de análisis de decisiones, como la elección del emplazamiento idóneo para una escombrera, son las siguientes:

1. Identificación del emplazamiento

- 1.1. Identificación de todos los posibles emplazamientos.
- 1.2. Elección de la zona de interés.
- 1.3. Elección de los criterios de eliminación de emplazamientos.
- 1.4. Determinación de las áreas posibles.
- 1.5. Visitas a los emplazamientos seleccionados.

En esta etapa se suele seleccionar como zona de interés aquella comprendida en un radio razonable tomando como centro la misma explotación minera. Un radio inicial aceptable puede ser de unos 5 km, puesto que con este radio se abarca una superficie en la que se pueden localizar varios emplazamientos potenciales y además es un límite adecuado a partir del cual las distancias harían económicamente inviable al proyecto.

Tras ello, se determinarán las posibles áreas que no pueden ser consideradas en etapas posteriores mediante criterios de eliminación, tales como:

- ° Áreas demasiado escarpadas.
- ° Áreas donde el acceso resulte complicado.
- ° Áreas con lagos o embalses con superficies mayores de 10 km².
- ° Áreas urbanas o residenciales.
- ° Zonas que atraviesen un río principal.

Con la superficie restante, se identificarán los emplazamientos potenciales mediante examen visual de mapas topográficos.

Por último, se recogerá *in situ* la mayor cantidad posible de datos tanto de la zona como del posible esquema de construcción de la escombrera más adecuada en dicho emplazamiento. Algunos de los datos que se pueden tomar en campo acerca del emplazamiento son los siguientes: capacidad (Mt), superficie (m²), altura de la escombrera (m), volumen de almacenamiento (m³), distancia a la mina (m), diferencia de altura respecto a la explotación (m), distancia a núcleos habitados (m), etc.

2. Objetivos y atributos

- 2.1. Determinación de los objetivos y atributos del emplazamiento en estudio.
- 2.2. Determinación de las cuestiones de mayor interés.
- 2.3. Definición de objetivos.
- 2.4. Definición de los atributos de cada objetivo.

Keeney (1982) identifica cinco Objetivos que debe cumplir el emplazamiento elegido:

- Objetivos de seguridad y salud.
- Objetivos económicos.
- Objetivos medioambientales.
- Objetivos socio-económicos.
- Objetivos referentes a las actitudes del público.

Elección y preparación del emplazamiento

Tras esto, y con el fin de determinar hasta qué punto un emplazamiento cumple con los objetivos específicos que se han marcado, se definen lo que se denominan atributos, que son las características del emplazamiento, tales como la capacidad, el coste o el impacto medioambiental que lleva implícito.

En la Fig. 3.4 se muestra un ejemplo de algunos de los objetivos y atributos que se pueden emplear en la elección del emplazamiento óptimo para una escombrera.

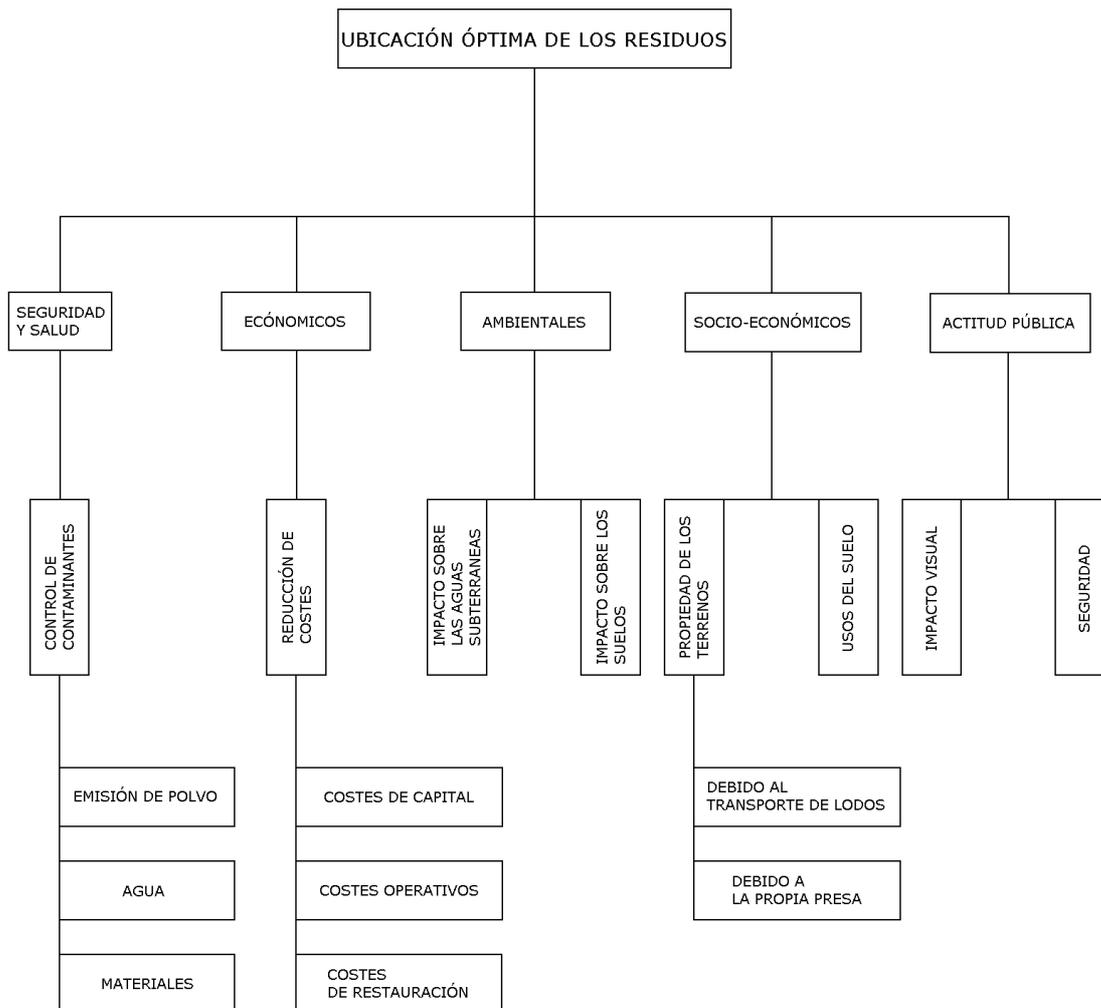


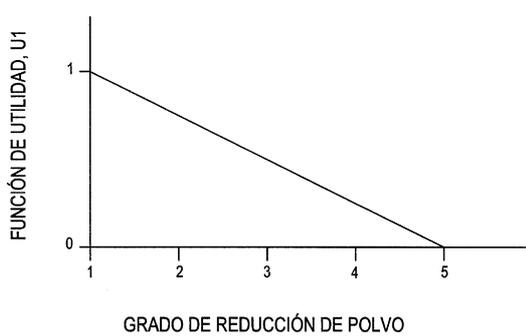
Figura 3.4. Objetivos principales y atributos para la elección de un emplazamiento de una escombrera.

Estos objetivos y atributos se seleccionan con el objeto de contestar las cuestiones primordiales que permiten conocer si un emplazamiento reúne las condiciones óptimas o no.

Para cada atributo, se elige una variable que describa de la mejor forma posible dicho atributo. La escala de medida de dicha variable podrá ser cuantificable, como la altura o el área, o simplemente podrá ser valorada cualitativamente, como el impacto visual que se producirá.

En la Tabla 3.6 se muestra un ejemplo de atributo y la escala de medida adoptada para cuantificar hasta qué punto un emplazamiento cumple con los objetivos definidos previamente.

TABLA 3.6. Control de la contaminación atmosférica por emisión de polvo.

Definición del atributo:	La contaminación atmosférica por emisión de polvo se refiere a la tendencia, la extensión y el posible impacto de ciertos granos de estériles que pueden ser dispersados por la zona debido a la acción del viento. Algunas medidas de esta contaminación pueden ser el área expuesta al viento, la fuerza del viento en la zona y el coste de realizar medidas de control de la emisión de polvo.
Grado de afección:	Viene dado en función de tres variables: la exposición de la escombrera a los vientos dominantes en la zona, la velocidad del viento y el área expuesta.
Función de utilidad:	Se adopta una función de utilidad de medida del riesgo neutra: <div style="text-align: center;">  </div>

El eje de abscisas de la representación gráfica de esta función se denomina categoría del atributo en estudio y, por ejemplo, para el caso de la reducción de la contaminación atmosférica por emisión de polvo, se obtiene de la Tabla 3.7:

TABLA 3.7. Categoría de la contaminación atmosférica por emisión de polvo.

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	CATEGORÍA				
		1	2	3	4	5
Exposición a los vientos dominantes	Dirección de los vientos dominantes y evaluación de la exposición del emplazamiento a los mismos.	Sin exposición, completamente protegido.	Baja exposición, alto grado de protección natural.	Exposición moderada con algún resguardo topográfico natural.	Alta exposición con algún resguardo natural.	Completamente expuesto, no existe ningún tipo de resguardo natural.
Velocidad del viento	Velocidad de los vientos reinantes en el emplazamiento, así como registro de la duración de los vientos más fuertes.	Muy baja.	Baja.	Media.	Alta.	Muy alta, vientos fuertes de larga duración.

3. Impactos del emplazamiento

- 3.1. Descripción de los posibles impactos que puede provocar el emplazamiento.
- 3.2. Cuantificación de impactos en función de los atributos.
- 3.3. Cuantificación del grado de incertidumbre, usando funciones de distribución probabilísticas.
- 3.4. Asesoramiento por parte del personal cualificado en la materia.
- 3.5. Recolección de datos.

4. Evaluación de los impactos

- 4.1. Evaluación de los impactos que pueda causar el nuevo emplazamiento.
- 4.2. Determinación de la forma que adoptará la llamada *Función de Utilidad*.
- 4.3. Cálculo de las funciones de utilidad para atributos individuales.
- 4.4. Cálculo de las *Funciones de Utilidad*.

Con el fin de evaluar el impacto de un nuevo emplazamiento para una escombrera y comparar las distintas alternativas que existen, se deben combinar y comparar los valores específicos obtenidos para cada atributo mediante los sistemas de análisis de toma de decisiones. Esto implica la definición de una Función de utilidad para cada atributo, que es simplemente una relación entre la escala de medida del atributo (categoría del atributo) y un número comprendido entre 0 y 1 (número de utilidad).

No todos los atributos tienen la misma importancia en la clasificación de los emplazamientos. De acuerdo con esta hipótesis, cada atributo y, por tanto, cada función de utilidad para cada emplazamiento deben ser valoradas. Nuevamente la elección de los pesos relativos de cada factor es subjetiva. La participación conjunta de los expertos en la materia dará como resultado la valoración de cada atributo como un porcentaje que puede ser discutido por otras personas cualificadas en el tema. Sin embargo, es fundamental decir cuál va a ser el peso relativo de cada factor para poder llegar a una elección final óptima.

5. Clasificación de emplazamientos y análisis comparativo de los mismos

- 5.1. Análisis comparativo de los posibles emplazamientos.
- 5.2. Verificación de las hipótesis formuladas.
- 5.3. Integración de la información anterior con el fin de evaluar las distintas alternativas.
- 5.4. Realización de un análisis de sensibilidad en función de las prioridades y de los impactos.
- 5.5. Reformulación de las hipótesis iniciales.

La última etapa consiste en realizar un análisis comparativo de las distintas opciones, clasificándolas en función de la prioridad. Estos procesos se realizan mediante al cálculo de la Función de Utilidad Global para cada emplazamiento. Consiste en multiplicar el Factor de Utilidad del emplazamiento por el Factor de Peso Relativo de cada atributo, resultando que se denomina Factor de Utilidad Ponderada. Por último, se obtiene la puntuación de la Función de Utilidad Global sumando para cada emplazamiento los valores obtenidos para el factor de utilidad del emplazamiento y para el factor de utilidad ponderado.

La clasificación de los emplazamientos se determina mediante la Función de Utilidad Global para cada emplazamiento. Así, cuanto mayor sea este valor, el puesto que ocupe el emplazamiento en la clasificación será mejor.

Como conclusión, se puede afirmar que el empleo de la metodología de las Funciones de Utilidad para seleccionar el emplazamiento ideal de una escombrera implica la necesidad de definir claramente los objetivos para las alternativas propuestas y de llevar a cabo un análisis comparativo racional de las distintas posibilidades que se manejan.

En la Tabla 3.8 se presenta una matriz que ayuda a evaluar los diferentes objetivos estimados y conocer la importancia o peso relativo de cada uno de ellos.

TABLA 3.8. Ejemplo de clasificación de emplazamientos.

ATRIBUTOS	ALTERNATIVAS				PESO RELATIVO
	A ₁	A ₂	A _i	A _m	
O ₁	P ₁₁	P ₂₁	P _{i1}	P _{m1}	W ₁
O ₂	P ₁₂	P ₂₂	P _{i2}	P _{m2}	W ₂
.
.
O _j	P _{1j}	P _{2j}	P _{ij}	P _{mj}	W _j
.
.
O _n	P _{1n}	P _{2n}	P _{in}	P _{mn}	W _n
UNIDAD RELATIVA FORMAL	$U_1 = \sum_j P_{1j} \cdot W_j$	$U_2 = \sum_j P_{2j} \cdot W_j$	$U_i = \sum_j P_{ij} \cdot W_j$	$U_m = \sum_j P_{mj} \cdot W_j$	

donde:

A_i = Alternativa de implantación de la escombrera i.

O_j = Objetivo j.

W_i = Peso relativo de importancia del Objetivo j (O_j)

P_{ij} = Orden inverso de preferencia de cada alternativa i con relación al objetivo j.

U_j = Utilidad relativa global de la alternativa i.

Ejemplo:

En las proximidades de una mina se dispone de tres alternativas de ubicación de la escombrera que se precisa construir a lo largo de la vida del proyecto. Los atributos que se han estudiado son los reflejados en la Tabla 3.9, así como los pesos relativos o factores de ponderación de cada uno de ellos.

TABLA 3.9. Ejemplo de elección de emplazamiento de una escombrera.

ATRIBUTOS	ALTERNATIVAS			PESO RELATIVO
	1	2	3	
Coste de transporte y construcción	2	1	3	0,35
Superficie afectada	3	2	2	0,1
Obras de drenaje	2	2	3	0,1
Ocultación a las vistas	2	1	3	0,2
Facilidad de revegetación	2	3	1	0,1
Contaminación de acuíferos	2	1	3	0,15
UNIDAD RELATIVA GLOBAL	2,1	1,4	2,7	

Según los resultados obtenidos, la mejor alternativa de implantación es la 3, seguida de la 1 y de la 2.

3.6. ESTUDIO DEL EMPLAZAMIENTO

El conocimiento de las propiedades del cimient y de los materiales de la escombrera será necesario para realizar un diseño correcto de la misma. En este sentido, también será importante establecer tanto la localización como la calidad del agua subterránea para poder predecir los impactos ambientales y establecer los programas de vigilancia adecuados.

Para seleccionar y obtener muestras representativas de los materiales, interpretar correctamente los resultados y aplicarlos al diseño, se requiere un conocimiento adecuado de ciertas propiedades físicas del medio. El tipo y cantidad de ensayos necesarios variará dependiendo de los siguientes factores: complejidad de las condiciones del emplazamiento, localización, tipo, tamaño y configuración de la escombrera, y características medioambientales. Para escombreras grandes, o situadas en ubicaciones ambientalmente sensibles, será necesario realizar una mayor cantidad de ensayos específicos.

La mayoría de los parámetros necesarios para el análisis y el diseño provienen de criterios empíricos basados en clasificaciones y descripciones cualitativas. En cualquier caso, cuando los programas de ensayos estén limitados o cuando los parámetros no se puedan hallar utilizando las técnicas habituales, se realizará un diseño más conservador.

3.6.1. Terrenos del cimient

A continuación se describirán las propiedades más importantes de los suelos del cimient, así como su aplicación en el diseño y sus métodos de medida en campo y en laboratorio. Esta descripción también se puede observar en la Tabla 3.10.

TABLA 3.10.

PROPIEDAD DEL MATERIAL	APLICACIÓN	ENSAYO EN CAMPO	ENSAYO EN LABORATORIO
DESCRIPCIÓN	<ul style="list-style-type: none"> ° Clasificación ° Durabilidad ° Correlación entre resistencia intacta y al corte 	<ul style="list-style-type: none"> S Descripción en campo S Clasificación preliminar S Sondeos con recuperación de testigos 	<ul style="list-style-type: none"> ° Análisis microscópico ° Clasificación detallada
PROPIEDADES	<ul style="list-style-type: none"> S Correlación entre resistencia y conductividad hidráulica S Evaluación del potencial de separación 	<ul style="list-style-type: none"> ° Estimación visual S Examen en campo S Ensayo de separación en campo 	<ul style="list-style-type: none"> ° Cribado ° Medida de la humedad (hidrómetro)
PLASTICIDAD DE LOS FINOS	<ul style="list-style-type: none"> ° Clasificación ° Correlación con la resistencia al corte ° Índice del contenido de arcilla 	<ul style="list-style-type: none"> ° Resistencia seca, dilatación y dureza 	<ul style="list-style-type: none"> S Límite de Atterberg en finos
RESISTENCIA INTACTA	<ul style="list-style-type: none"> ° Durabilidad ° Correlación con la resistencia al corte 	<ul style="list-style-type: none"> ° Ensayo de carga puntual ° Dureza en campo 	<ul style="list-style-type: none"> ° Ensayo triaxial ° Ensayo de compresión simple
RESISTENCIA AL CORTE	<ul style="list-style-type: none"> ° Criterio de rotura ° Estabilidad de escombreras 	<ul style="list-style-type: none"> ° Ensayo de corte en campo ° Ángulo de reposo 	<ul style="list-style-type: none"> S Ensayos de corte directo o triaxial
MINERALOGÍA Y PETROGRAFÍA	<ul style="list-style-type: none"> S Índice de hinchamiento S Durabilidad S Microestructura S Clasificación 	<ul style="list-style-type: none"> S Ensayo de acidez para carbonatos 	<ul style="list-style-type: none"> S Difracción de R-X S Límite de Atterberg en finos
DURABILIDAD	<ul style="list-style-type: none"> S Reducción de la conductividad hidráulica S Duración en firmes y base de cimentación. S Reducción de la resistencia al corte 	<ul style="list-style-type: none"> ° Meteorización de la superficie 	<ul style="list-style-type: none"> ° Durabilidad al desmenuzarse ° Ensayos de abrasión
CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	<ul style="list-style-type: none"> ° Estimación de la infiltración ° Predicción de las condiciones piezométricas ° Cálculo del drenaje 	<ul style="list-style-type: none"> ° Correlación basada en la granulometría 	<ul style="list-style-type: none"> S Compactación y permeabilidad
CONSOLIDACIÓN Y ASENTAMIENTO	<ul style="list-style-type: none"> ° Resistencia al corte ° Consolidación y asentamiento 	<ul style="list-style-type: none"> ° Peso unitario a partir del esponjamiento 	
GEOQUÍMICA	<ul style="list-style-type: none"> ° Impacto medioambiental ° Riesgo por lixiviación de metales pesados. Adsorción ° Drenajes ácidos. Neutralización 	<ul style="list-style-type: none"> ° Determinación de surgencias de agua ° Medida del pH en flujos de agua, conductividad, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> ° Lixiviación en columna ° Celdas de humedad ° Medida de la acidez ° Ensayos para determinar contaminantes

Fuente: Mined Rock and Overburden Piles (1991).

Elección y preparación del emplazamiento

3.6.2. Descripción

Se debe realizar una descripción de los diferentes suelos que aparecen en el emplazamiento elegido. Dicha descripción debe incluir características tales como el color, la granulometría, la textura, el olor, la estructura, etc., que ayuden a la identificación y clasificación del suelo, además de indicar los procesos de meteorización que haya sufrido. La clasificación del suelo permitirá separar los distintos tipos de suelos que conforman el terreno y analizarlos por separado.

Las descripciones preliminares se suelen realizar en campo mediante la perforación de sondeos y reconocimientos. Las condiciones en campo no suelen ser ideales y algunas técnicas de muestreo no pueden proporcionar descripciones detalladas, por lo que se debe recurrir a ensayos en laboratorio, principalmente con microscopio.

3.6.3. Propiedades y clasificación

Se deben determinar las propiedades de cada tipo de suelo que se haya identificado durante las investigaciones en campo. Dichas propiedades, como la granulometría y plasticidad, son fundamentales para la clasificación del suelo, mientras que la resistencia, permeabilidad y consolidación se deberán tener en cuenta en el diseño. Ciertos parámetros, como el contenido de humedad, densidad y peso específico, proporcionan información referente a la relación volumen-peso que podrá ser usada para el cálculo del grado de consolidación, la presión de preconsolidación, la porosidad, cálculos de estabilidad, etc. El contenido de humedad natural también indica el estado del suelo *in situ* en relación con sus límites líquido y plástico.

La estimación preliminar de la granulometría suele realizarse de forma visual en campo, de forma que se pueda estimar el porcentaje de guijarros, cantos rodados, grava, arena, limo y arcilla que aparezcan. La consistencia o plasticidad de los finos se puede estimar cualitativamente realizando diversos ensayos en campo, como dilatancia, resistencia seca y rugosidad.

Aunque existen numerosas clasificaciones, la más utilizada y mundialmente aceptada es la SCSU (Sistema de clasificación de suelos unificada), siendo aplicable a la mayoría de los tipos de suelo, excepto en el caso de suelos donde predominen los guijarros y grandes cantos rodados.

Tras una clasificación preliminar en campo, se realizarán ensayos en laboratorio que confirmen dicha clasificación y la completen. Los análisis de granulometría en laboratorio se componen de tamizado, para granos gruesos, y sedimentación, para grano fino. También se estimarán los límites de Atterberg, la humedad natural, la densidad seca y la porosidad para conocer la consistencia del suelo.

3.6.4. Conductividad hidráulica

El conocimiento de la conductividad hidráulica es necesario para analizar las filtraciones, predecir las condiciones piezométricas, conocer la efectividad del recubrimiento y diseñar el sistema de drenaje. En la mayoría de las escombreras, será suficiente el conocimiento de la conductividad hidráulica a partir de relaciones empíricas basadas en las propiedades y descripción del suelo. Para casos más complejos, como la aparición de un medio ambientalmente sensible o dificultades en la cimentación, serán necesarias medidas más específicas basadas en ensayos en laboratorio.

Los ensayos *in situ* son el método más utilizado para obtener datos relacionados con la conductividad hidráulica, ya que los materiales pueden ser analizados en su estado natural con la mínima distorsión. Además, ciertas características del suelo, como su estructura o textura, que influyen de forma importante en la conductividad hidráulica, son muy difíciles de simular en laboratorio.

Con los ensayos con infiltrómetros y piezómetros se puede obtener un conocimiento detallado de la infiltración en suelos naturales y confirmar la conductividad hidráulica de los revestimientos. Cuando existan acuíferos, se deberá aplicar un bombeo que facilite la determinación de los parámetros de dicho acuífero, como son la transmisividad y los aportes de agua.

Los ensayos de permeabilidad en laboratorio consisten en permeámetros utilizados en muestras relativamente inalteradas. Estas medidas se pueden obtener en conjunto con los ensayos de consolidación de suelos de grano fino como se describe a continuación.

3.6.5. Consolidación

En aquellos casos en los que la cimentación de la escombrera se realice sobre suelos de grano fino, será necesario obtener datos sobre la consolidación que se pueda producir. Esta información será necesaria para predecir los posibles asentamientos y la generación de presiones intersticiales excesivas debido a la carga de la escombrera. Una presión intersticial excesiva puede reducir la estabilidad de la escombrera durante su construcción, por lo que el grado de seguridad a lo largo de la vida de la misma vendrá limitado por la disipación de la presión intersticial excesiva.

Los asentamientos debidos a la consolidación de los cimientos también pueden reducir las filtraciones, aumentando la resistencia al corte. Por otro lado, esta consolidación provoca deformaciones en el material de la escombrera con un cambio en su resistencia al corte y en su comportamiento. Si los asentamientos son importantes, se producirá la rotura de las capas de drenaje, diques perimetrales, etc., por lo que se deberá tener muy en cuenta en el diseño.

Los ensayos en laboratorio consisten en ensayos de consolidación unidimensionales de muestras inalteradas. Alternativamente, los parámetros de consolidación y conductividad hidráulica se podrán obtener a partir de ensayos triaxiales y ensayos de corte directo. Cuando el grado de disipación de la presión intersticial o los asentamientos sean críticos en el diseño de la escombrera, se recomienda utilizar un sistema de vigilancia en campo para asegurarse de los valores obtenidos en laboratorio. Este sistema de vigilancia consiste en la colocación de extensómetros o inclinómetros, que midan los movimientos del terreno, y piezómetros para controlar la presión intersticial.

3.6.6. Resistencia

Las características resistentes de la cimentación serán muy importantes para definir su estabilidad y su capacidad portante. Para una estimación inicial, o cuando la escombrera se construya sobre estratos competentes, se adoptarán criterios conservadores basados en relaciones con la clasificación del suelo y sus propiedades, o a partir de ensayos sencillos en campo.

Cuando las condiciones de la cimentación sean difíciles, esté formada por suelos de grano fino, blando o

Elección y preparación del emplazamiento

susceptible de consolidación, o se prevea la generación de presiones intersticiales y otros efectos adversos, será necesario realizar ensayos en campo y en laboratorio más detallados. El número y tipo de ensayos a realizar dependerá de la complejidad del emplazamiento, de la naturaleza del suelo y de las condiciones de carga a las que va a ser sometido.

Donde aparezcan cimentaciones formadas por suelos de grano fino, normalmente, éstas representarán el estrato más blando, por lo que merecen una especial atención. Las muestras inalteradas de terreno serán sometidas a ensayos de compresión simple, compresión triaxial y corte directo. Las condiciones de los ensayos, es decir, presión intersticial, carga, presión de confinamiento, etc., deberán ser controladas para simular las condiciones reales de la etapa de construcción de la escombrera que, normalmente, es el caso más crítico. Se deberán realizar los ensayos suficientes para establecer correctamente la características de tensión/resistencia de cada estrato del suelo.

Las muestras inalteradas de suelos de grano grueso son, en la mayoría de los casos, muy difíciles de obtener, al igual que mezclas de distintos tamaños de grano, por lo que el uso de penetrómetros indicará las condiciones de resistencia más fiables. Los análisis en laboratorio de suelos de grano grueso o de mezclas se limitan a ensayos triaxiales y de corte directo de muestras reconstituidas, que, posiblemente, no sean representativas de las condiciones *in situ*. Los resultados de estos ensayos se deben interpretar como valores de resistencia conservadores y sólo se realizarán cuando los estudios preliminares indiquen que la resistencia al corte es un parámetro crítico en el diseño de la escombrera.

Relacionando las características del terreno con los aspectos del diseño, se puede señalar que en el vertido de estériles sin cohesión sobre un cimiento competente, la pendiente máxima de la escombrera será igual al ángulo de reposo de dichos estériles. El ángulo de reposo representa el límite inferior del ángulo de rozamiento interno del vertido y varía entre 30° y 40°. Cuando el cimiento esté nivelado y sea competente, además de poseer un drenaje adecuado, la altura alcanzada por estériles sin cohesión formando su ángulo de reposo es, prácticamente, ilimitada. Cuando se viertan estériles no cohesivos sobre cimientos blandos, la máxima altura permitida de la escombrera estará controlada por la resistencia al corte del cimiento. En la Fig. 3.5 aparecen esquemas de las alturas y pendientes permitidas en el vertido de materiales no cohesivos dependiendo de las características del cimiento.

Las alturas y pendientes máximas permitidas en escombreras que contengan materiales cohesivos y situadas sobre terrenos competentes estarán determinadas por la resistencia del material de la escombrera, mientras que si el cimiento tiene unas características blandas, la altura y la pendiente vendrán determinadas por la resistencia de dicho terreno. En la Fig. 3.6 se pueden observar unos esquemas de las distintas alturas y pendientes de las escombreras.

Los análisis en campo de suelos complejos que, normalmente, se realizan junto a la perforación de sondeos, consisten en ensayos de penetración estándar o con penetrómetros de cono. Con estos datos de resistencia a la penetración se podrá obtener la resistencia al corte basándose en relaciones empíricas. Además, servirán para comprobar los resultados obtenidos en laboratorio.

3.6.7. Mineralogía y química del suelo

La presencia de minerales arcillosos de baja resistencia o propensos a hinchamientos pueden causar importantes cambios en las características de resistencia al corte y en el comportamiento del suelo. Además,

la química del suelo y la mineralogía influyen en la capacidad de los materiales del cimiento para neutralizar los lixiviados y absorber los elementos contaminantes provenientes de la escombrera.

Aunque algunos parámetros químicos del suelo pueden ser medidos en campo, la mayoría de los análisis se realizan en laboratorio. Los ensayos para conocer la mineralogía y los elementos contaminantes, principalmente, estudios de difracción de rayos X, se deben hacer en aquellos casos en los que el medio ambiente sea muy sensible. Por otro lado, cuando sea posible la generación de aguas ácidas debido a las características de los materiales de la escombrera, se procederá a la determinación de la naturaleza ácido-base de los suelos del cimiento.

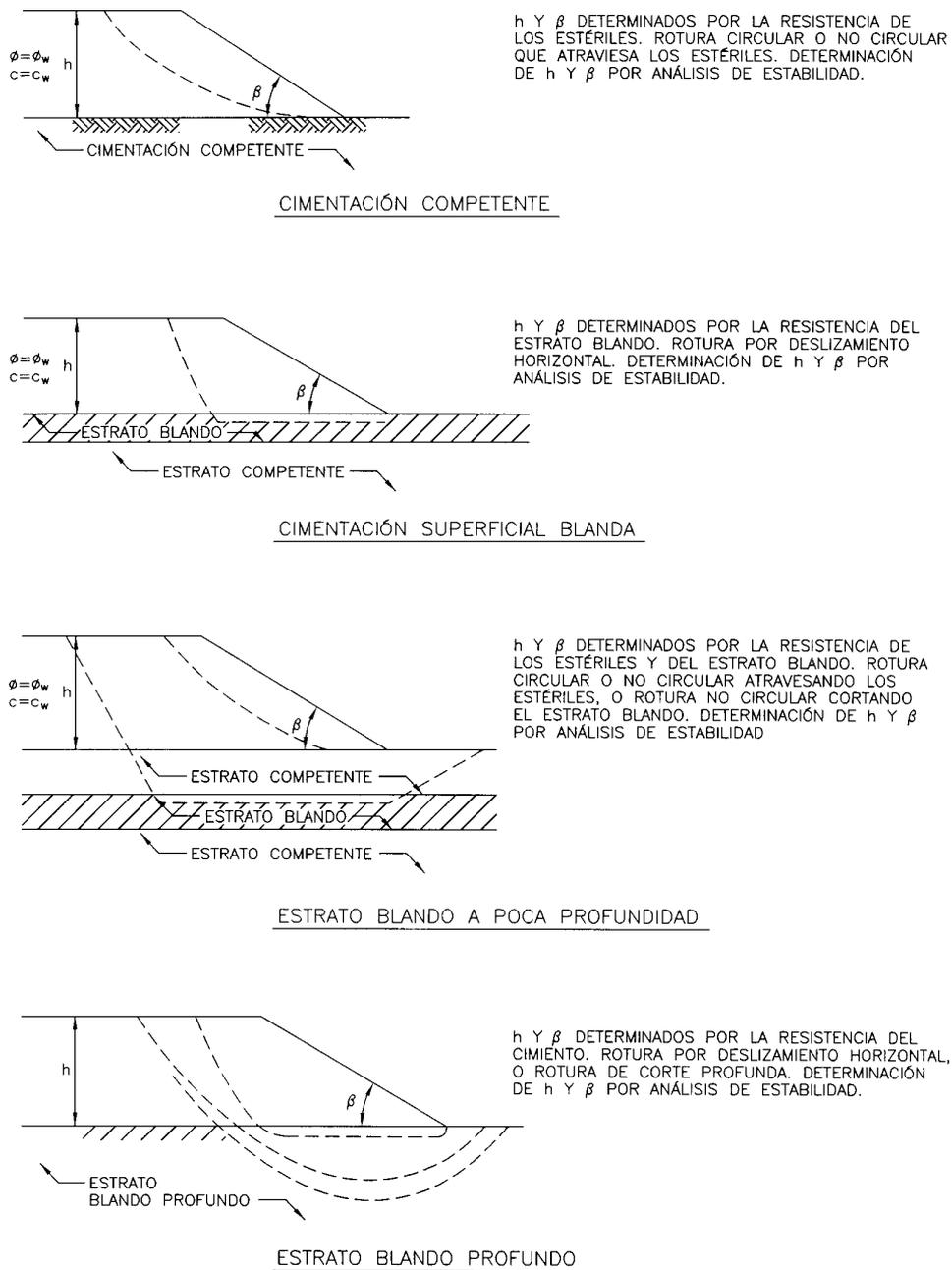
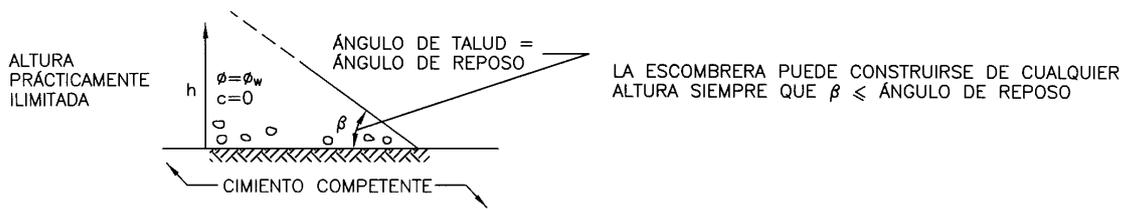
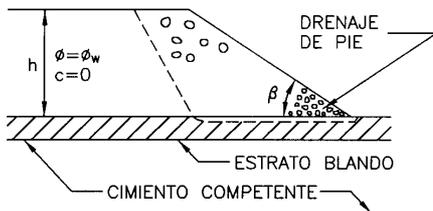


Figura 3.5. Altura y pendiente máxima de escombreras de estériles sin cohesión (CANMET, 1979).

Elección y preparación del emplazamiento

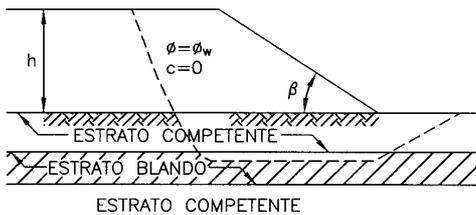


ESTÉRILES GRUESOS CON ROZAMIENTO SOBRE CIMENTO COMPETENTE



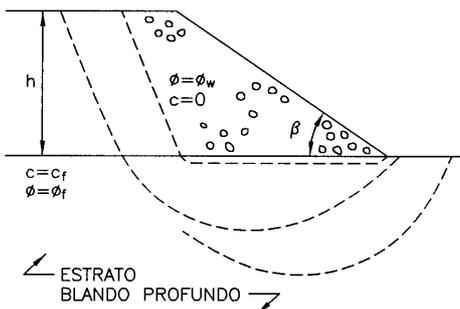
h Y β DETERMINADOS POR LA RESISTENCIA AL ESTRATO BLANDO. ROTURA POR DESLIZAMIENTO HORIZONTAL. DETERMINACIÓN DE h Y β POR ANÁLISIS DE ESTABILIDAD.

ESTÉRILES CON ROZAMIENTO SOBRE CIMENTO BLANDO SUPERFICIAL



h Y β DETERMINADOS POR LA PROFUNDIDAD Y RESISTENCIA DEL ESTRATO BLANDO. ROTURA POR DESLIZAMIENTO HORIZONTAL. DETERMINACIÓN DE h Y β POR ANÁLISIS DE ESTABILIDAD.

ESTRATO BLANDO A POCA PROFUNDIDAD



h Y β DETERMINADOS POR LA RESISTENCIA DEL CIMENTO. ROTURA POR DESLIZAMIENTO HORIZONTAL O ROTURA DE CORTE PROFUNDA. DETERMINACIÓN DE h Y β POR ANÁLISIS DE ESTABILIDAD.

ESTRATO BLANDO PROFUNDO

Figura 3.6. Altura y pendiente máxima de escombreras de estériles cohesivos (CANMET, 1979).

3.6.8. Densidad *in situ*

La densidad *in situ* de los suelos influye directamente en la resistencia al corte y capacidad de asentamientos

del cimiento, además de la resistencia a la licuefacción, sobre todo en aquellos casos en que el cimiento esté formado por suelos arenosos o limosos. En esta situación, se podrán utilizar relaciones empíricas entre la densidad, el potencial de licuefacción y la resistencia a la penetración. La densidad *in situ* de suelos de grano fino se determinará en laboratorio junto con los ensayos de consolidación o resistencia al corte.

3.6.9. Compactación

El conocimiento de las características de compactación del suelo del cimiento será necesario si en el diseño se contempla alguna construcción de protección, como bermas o revestimientos, que necesiten el uso de maquinaria de compactación. Las medidas en campo quedan restringidas, normalmente, a las medidas de densidad en sondeos mediante el uso de densímetros, mientras que el ensayo de compactación habitualmente utilizado en laboratorio será el Proctor modificado o estándar.

3.7. SUSTRATO ROCOSO DEL CIMIENTO

Además de las características geológicas básicas del cimiento rocoso que, normalmente, serán evaluadas durante la fase de investigación en campo, se necesitarán hallar otras propiedades importantes en el diseño de la escombrera que serán descritas a continuación y que también se pueden observar en la Tabla 3.11. En los casos en que aparezcan rocas con un comportamiento semejante a un suelo, se realizarán los análisis y ensayos descritos en el apartado anterior.

3.7.1. Descripción

Se debe preparar una descripción de cada uno de los tipos de rocas principales que se hayan encontrado durante las investigaciones en campo, y clasificarlas según su litología y origen. Una descripción y clasificación básica será útil para conocer las características generales del cimiento. Las estimaciones cualitativas preliminares de los parámetros más importantes, tales como resistencia a compresión y durabilidad, pueden basarse en valores típicos dados a cada tipo de roca hallada. En la mayoría de los casos, no serán necesarios análisis más detallados.

Normalmente, un geólogo experto podrá describir en campo, y a partir de un análisis visual, los distintos tipos de roca con el suficiente detalle. Sin embargo, en algunos casos será necesario efectuar investigaciones más profundas referentes a la mineralogía o petrografía de la roca para su correcta descripción.

3.7.2. Resistencia

La resistencia de la roca intacta y la resistencia al corte de las discontinuidades pueden influir en la estabilidad y capacidad portante de la cimentación. Las estimaciones preliminares de la resistencia a compresión pueden basarse en correlaciones empíricas o en ensayos de dureza en campo. Cuando sea necesaria una mayor información, se pueden realizar ensayos de carga puntual en muestras provenientes de los testigos de sondeos. Los ensayos de resistencia intacta en laboratorio se hacen en aquellos casos en los que la cimentación rocosa sea muy blanda. Para estudiar la resistencia al corte de las discontinuidades se utilizan ensayos de inclinación en campo o ensayos de corte directo en laboratorio.

TABLA 3.11.

PROPIEDAD DEL MATERIAL	APLICACIÓN	ENSAYO EN CAMPO	ENSAYO EN LABORATORIO
DESCRIPCIÓN: S Litología S Origen S Textura y microestructura	S Clasificación S Durabilidad S Correlación con resistencia intacta S Resistencia anisotrópica y planos de discontinuidad	S Descripción en campo S Clasificación preliminar	S Análisis microscópico S Clasificación detallada
RESISTENCIA INTACTA	S Estabilidad de la cimentación S Capacidad portante	S Ensayo de carga puntual S Dureza en campo	S Ensayo triaxial S Ensayo de compresión simple
RESISTENCIA AL CORTE DE LAS DISCONTINUIDADES	S Estabilidad de la cimentación	S Ensayos de inclinación S Análisis retrospectivos de roturas naturales	S Ensayos de corte directo
MINERALOGÍA Y PETROGRAFÍA	S Hinchamiento de arcillas S Durabilidad S Microestructura S Clasificación	S Ensayo de acidez para carbonatos	S Difracción de R-X S Límite de Atterberg en finos S Análisis geoquímicos
DURABILIDAD	S Reducción de la resistencia y capacidad portante S Transitabilidad S Reducción de la conductividad hidráulica	S Meteorización de la superficie	S Durabilidad al desmenuzarse S Ensayos de abrasión con sulfatos
CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	S Estimación de la infiltración S Predicción de las condiciones piezométricas	S Piezómetros S Ensayos de infiltraciones S Control de acuíferos	

Fuente: Mined Rock and Overburden Piles (1991).

3.7.3. Mineralogía y petrografía

La presencia de minerales arcillosos de baja resistencia o susceptibles de hinchamiento, y la aparición de microfisuras y otras texturas de la roca, pueden influir de manera importante en la durabilidad y resistencia

de la cimentación. Un conocimiento de la mineralogía de la roca puede ayudar en su clasificación y descripción. Los métodos para estudiar la mineralogía y petrografía de la arcilla en laboratorio incluyen la difracción de rayos X y el microscopio electrónico. La determinación de los límites de Atterberg también puede ser útil en la identificación de los minerales arcillosos.

3.7.4. Durabilidad

La durabilidad de los materiales de la cimentación puede influir en la estabilidad a largo plazo. Las características de resistencia al corte y la capacidad portante pueden disminuir con el tiempo si el lecho de roca sufre un proceso de degradación. Un conocimiento cualitativo preliminar de la susceptibilidad de dicho lecho a la degradación se puede basar en observaciones de la meteorización de la superficie y en el hinchamiento o degradación de los testigos de sondeos. Si estos estudios iniciales indican que las características del lecho de roca facilitan la meteorización y degradación, se realizarán ensayos de durabilidad al desmoronamiento, que indican la susceptibilidad de la roca a la rotura mecánica, y ensayos de estabilidad a los sulfatos que es una medida de la susceptibilidad a la degradación por efectos de congelación-descongelación.

3.7.5. Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica de la cimentación afecta a la filtración y a las condiciones piezométricas, y puede determinar la necesidad de instalación de revestimientos o medidas de control del drenaje. Cuando las investigaciones preliminares en campo señalen acuíferos importantes o condiciones adversas, será necesario realizar ensayos de conductividad hidráulica. El único método práctico de conocer dicha conductividad del lecho rocoso se basa en técnicas de control *in situ* tales como infiltración, piezómetros o sondeos.

3.8. RECUBRIMIENTO

Como recubrimiento se entiende todos los suelos superficiales que deben ser trasladados debido a la explotación minera, y que serán incorporados a la escombrera o utilizados como recubrimiento o cobertera final antes de la restauración. Cuando el volumen de suelo superficial incluido en la escombrera sea grande puede tener una gran influencia en la estabilidad y la conductividad hidráulica, mientras que cuando se utilice como recubrimiento final, sus características influirán en las filtraciones producidas además de la erosión y la estabilidad. Las propiedades más importantes del material del recubrimiento, su influencia en el diseño y los métodos de análisis se resumen en la Tabla 3.12.

3.8.1. Descripción, propiedades y clasificación

Como en los casos anteriores, la descripción, propiedades y clasificación del terreno será útil para poder separar los distintos tipos de suelos que aparecen y poder analizarlos separadamente, compararlos y distinguir sus diferencias, para completar los estudios preliminares. La descripción y clasificación se deberá realizar para todos los tipos de suelos que aparezcan en el recubrimiento. En este sentido, se determinará la granulometría, límites de Atterberg y contenido en humedad para conocer su distribución a través del depósito.

TABLA 3.12.

PROPIEDAD DEL MATERIAL	APLICACIÓN	ENSAYO EN CAMPO	ENSAYO EN LABORATORIO
DESCRIPCIÓN: S Color S Olor S Textura S Estructura	S Clasificación S Identificación de suelos problemáticos S Meteorización S Correlaciones empíricas S Muestras para ensayos	S Descripción en campo	S Análisis microscópico
PROPIEDADES: S Granulometría S Plasticidad S Contenido de humedad S Densidad S Peso específico	S Clasificación S Correlaciones empíricas con la conductividad hidráulica, resistencia y consolidación S Relaciones volumen/peso	S Estimación visual de la granulometría S Estimación de la plasticidad S Ensayos de densidad y humedad <i>in situ</i> S Clasificación preliminar	S Tamizado S Sedimentación S Límites de Atterberg S Métodos de medida de los parámetros de volumen y peso S Clasificación
CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	° Estimación de la infiltración S Predicción de las condiciones piezométricas S Conocimiento del drenaje de roca S Posibles usos de capas de baja conductividad hidráulica	S Correlaciones empíricas con la granulometría S Ensayos de infiltraciones	S Permeámetro de compactación S Ensayo triaxial
RESISTENCIA	S Resistencia al corte S Estabilidad del talud	S Correlaciones empíricas con las propiedades S Ensayos de resistencia <i>in situ</i>	S Ensayo triaxial S Ensayo de corte directo
DENSIDAD Y COMPACTACIÓN	S Resistencia al corte S Consolidación y asentamientos S Diseño de revestimientos S Diseño de medidas de control	S Densidad basada en el factor de esponjamiento S Densímetros	S Ensayo Proctor modificado
MINERALOGÍA Y PETROGRAFÍA	S Hinchamiento de arcillas S Neutralización y adsorción S Documentación de zonas contaminadas S Estudios de reclamación	S Ensayo de acidez para carbonatos	S Difracción de R-X S Determinación ácido-base S Adsorción S Otros ensayos físicos y químicos

Fuente: Mined Rock and Overburden Piles (1991).

3.8.2. Conductividad hidráulica

Dependiendo de la cantidad y distribución del recubrimiento en la escombrera, la conductividad hidráulica de éste puede jugar un papel importante en las filtraciones y desarrollo de presiones piezométricas que aparezcan. Sin embargo, debido a la dificultad de estimar la conductividad hidráulica de los estériles, será suficiente con una aproximación empírica basada en la granulometría. Si se van a verter grandes cantidades de terreno de recubrimiento en la escombrera o va a ser utilizado como revestimiento o recubrimiento final de ésta, es recomendable un ensayo de permeámetro de compactación.

3.8.3. Resistencia al corte

Si los materiales del recubrimiento ocupan una parte importante de la escombrera o están situados de forma que puedan crear una zona de debilidad, es necesario un estudio de la resistencia al corte. Cuando los suelos contienen una alta porción de finos, especialmente minerales arcillosos, pueden proporcionar unas propiedades, como cohesión e impermeabilidad, que pueden ser aprovechados en el diseño. Un valor aproximado de la resistencia al corte puede obtenerse por correlación empírica con las propiedades descritas anteriormente, siendo los ensayos en laboratorio, tales como el corte directo y triaxial, los más indicados cuando se necesiten datos más exactos.

3.8.4. Densidad

La densidad *in situ* del recubrimiento influirá en la resistencia al corte y en las características de asentamiento de la escombrera. Sin embargo, debido a la dificultad para hallar esta densidad y por su variación dentro de la propia escombrera, no es habitual obtener datos demasiado precisos de la misma.

Cuando el suelo superficial se vaya a utilizar como revestimiento o recubrimiento final, se debe realizar un ensayo de compactación del terreno que, normalmente, será un ensayo Proctor modificado.

3.8.5. Mineralogía y química

La composición mineralógica y química del revestimiento puede ser importante en relación con el impacto ambiental. La presencia de ciertos tipos de arcillas puede fijar los elementos contaminantes o disminuir su liberación y, además, puede ser exigido un estudio químico básico del suelo para cumplir con la legislación vigente.

Si los ensayos del resto de materiales que aparecen en la escombrera indican un posible aumento de los elementos contaminantes, serán necesarios estudios más detallados del recubrimiento constituidos por ensayos de difracción de rayos X, determinación ácido-base, adsorción y conocimiento específico de dichos elementos contaminantes.

3.9. CALIDAD DEL AGUA

La documentación relativa a la calidad del agua subterránea y a la localización de la superficie freática es un

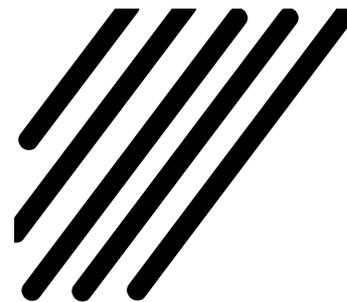
Elección y preparación del emplazamiento

componente esencial en cualquier investigación y programa de diseño de escombreras. Los estudios de calidad de agua proporcionan un método adecuado para definir un programa de vigilancia ambiental.

Se debe realizar un análisis de la calidad de las aguas en todas las corrientes naturales tanto permanentes como temporales. Los riachuelos deben ser controlados a intervalos regulares durante su recorrido, sobre todo aguas arriba y aguas abajo del área de explotación. Las localizaciones de los puntos de toma de muestras y su frecuencia vendrán determinados por los organismos responsables.

3.1. INTRODUCCIÓN	1-1
3.2. LUGAR DE EMPLAZAMIENTO	1-1
3.3. TAMAÑO Y FORMA. CLASIFICACIÓN DE ESCOMBRERAS	3-3
3.4. GEOLOGÍA Y CAPACIDAD PORTANTE	3-5
3.5. METODOLOGÍA PARA LA ELECCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO	3-5
3.5.1. Método del Índice de Calidad	3-6
3.5.2. Método de las Funciones de Utilidad	3-8
3.6. ESTUDIO DEL EMPLAZAMIENTO	3-14
3.6.1. Terrenos del cimiento	3-14
3.6.2. Descripción	3-16
3.6.3. Propiedades y clasificación	3-16
3.6.4. Conductividad hidráulica	3-16
3.6.5. Consolidación	3-17
3.6.6. Resistencia	3-17
3.6.8. Densidad <i>in situ</i>	3-20
3.6.9. Compactación	3-21
3.7. SUSTRATO ROCOSO DEL CIMIENTO	3-21
3.7.1. Descripción	3-21
3.7.2. Resistencia	3-21
3.7.3. Mineralogía y petrografía	3-22
3.7.4. Durabilidad	3-23
3.7.5. Conductividad hidráulica	3-23
3.8. RECUBRIMIENTO	3-23
3.8.1. Descripción, propiedades y clasificación	3-23
3.8.2. Conductividad hidráulica	3-25
3.8.3. Resistencia al corte	3-25
3.8.4. Densidad	3-25
3.8.5. Mineralogía y química	3-25
3.9. CALIDAD DEL AGUA	3-25

capítulo 4



CONSTRUCCIÓN DE ESCOMBRERAS

4.1. INTRODUCCIÓN

El método de construcción de escombreras tiene una gran importancia sobre la homogeneidad y estabilidad de la misma, predominando la estratificación horizontal o la paralela al talud. Además, se deberá prestar una especial atención al sistema de vertido. Así, se diferenciará el sistema de vertido directo desde camión o cinta, que será admisible en escombreras de pequeña envergadura y cuando no exista riesgo de rodadura de piedras, del sistema de vertido por empuje con tractor de orugas o pala.

Por otro lado, el recrecido de la escombrera se debe realizar de la forma más homogénea posible, que será por capas o tongadas horizontales. Para este mismo fin, se evitará que los escombros de distinta naturaleza se combinen en una misma zona de la escombrera.

4.2. PREPARACIÓN DEL CIMIENTO Y SISTEMAS DE DRENAJE

Dependiendo de la situación, tanto el control del drenaje como la preparación del cimiento puede jugar un papel importante en la estabilidad de la escombrera. Ambos aspectos deben ser contemplados en la etapa de diseño y controlarse durante la etapa de construcción u operación de dicha estructura. Es importante que todas las obras que se efectúen queden debidamente documentadas para estudios futuros.

4.2.1. Preparación del cimiento

La preparación del cimiento de apoyo de la escombrera debe ser un capítulo más del proyecto, siendo debidamente modificado durante la construcción en función de criterios tales como niveles piezométricos, superficie y carga a soportar por la base de apoyo.

Los trabajos de preparación de los terrenos a ocupar pueden ir desde un simple desbroce, con eliminación de la vegetación existente antes del vertido, hasta una completa retirada selectiva de los horizontes de suelo

Construcción de escombreras

más superficiales y su posterior aprovechamiento en los trabajos de restauración, así como la deforestación previa de esas superficies. También se puede realizar la excavación de suelos de recubrimiento que, aún no siendo aptos para la restauración, ofrecen una baja capacidad portante o baja resistencia.

En la mayoría de los casos, tanto la cubierta vegetal como los suelos de cobertera afectan negativamente a la estabilidad de las escombreras.

En algunos emplazamientos se pueden precisar distintas actuaciones además de las indicadas, tales como el refuerzo o consolidación del material de la base de apoyo, o la construcción de un sistema de drenaje. El grado de preparación del cimientto debe valorarse económicamente y compararse con los costes de tratamiento de otras posibles alternativas teniendo en cuenta los diseños de esas estructuras, las secuencias constructivas y los ritmos de vertido.

Cuando existe ya una escombrera y se pretenda actuar sobre el cimientto contiguo aún sin ocupar, se prestará una atención especial a las medidas de seguridad tanto del personal como de los equipos que estén trabajando en el lugar. En tales situaciones se debe suspender el vertido en las zonas próximas y comprobar la estabilidad de los taludes que forman los estériles en las proximidades de la zona donde se vaya a trabajar. Se recomienda preparar, con suficiente antelación, el cimientto de apoyo de la escombrera, tanto en su totalidad como parcialmente, dejando una franja de seguridad hasta el pie del talud de vertido.



Foto 4.1. Retirada de la vegetación y suelos de recubrimiento para la construcción posterior de una escombrera.

4.2.2. Drenaje

El control del agua es un aspecto básico en la construcción y operación de las escombreras. Las fuentes

principales de agua que deben considerarse con vistas al drenaje de las escombreras y las superficies circundantes de éstas son las siguientes:

- ° Escorrentías de los terrenos que constituyen la cuenca de recepción de las escombreras.
- ° Precipitaciones directas de agua o nieve sobre la escombrera.
- ° Filtraciones del cimientado de apoyo o de laderas ocupadas por la escombrera.
- ° Labores subterráneas abandonadas que actúan como vías de drenaje de las explotaciones.
- ° Arroyos o cauces de agua existentes en emplazamientos de vaguada.

Los fenómenos principales que deben estudiarse con relación a estas fuentes de agua son: la estabilidad y erosión de las escombreras, así como la calidad de las aguas procedentes de dichos depósitos.

Existen ciertas normas o recomendaciones encaminadas a mejorar la resistencia de las masas de estériles frente a los deslizamientos, así como a rebajar los niveles de agua dentro de las estructuras. Así, la primera norma a seguir consiste en la retirada de la vegetación y de los suelos del lugar de asentamiento. La descomposición de esta vegetación con el tiempo y la existencia de una capa de suelo, constituyen una zona de rotura probable por la baja resistencia al corte que presentan. En el caso de que estos materiales no puedan ser apartados, se recomienda la compactación o tratamiento de mejora de los mismos.

Si existe agua estancada en la base de apoyo deberá ser drenada antes de verter los primeros estériles o, si esto no es posible, rellenar dichas zonas con material de escollera. En zonas de surgencia de acuíferos se procederá a la captación y drenaje de las mismas con la doble finalidad de evitar el efecto de las presiones intersticiales del agua en la escombrera y conservar las fuentes y manantiales. Si la surgencia es puntual, la captación se hace mediante una arqueta construida sobre el terreno explanado, Fig. 4.1. Desde ésta se suele sacar una tubería de PVC de 50-75 mm de diámetro y exteriormente un tubo metálico de acero corrugado, flexible y muy resistente, que permita adaptarse a los asentamientos del terreno. Con este sistema se pueden ir depositando los estériles encima y, al mismo tiempo, ir acoplando los tubos necesarios durante el avance.

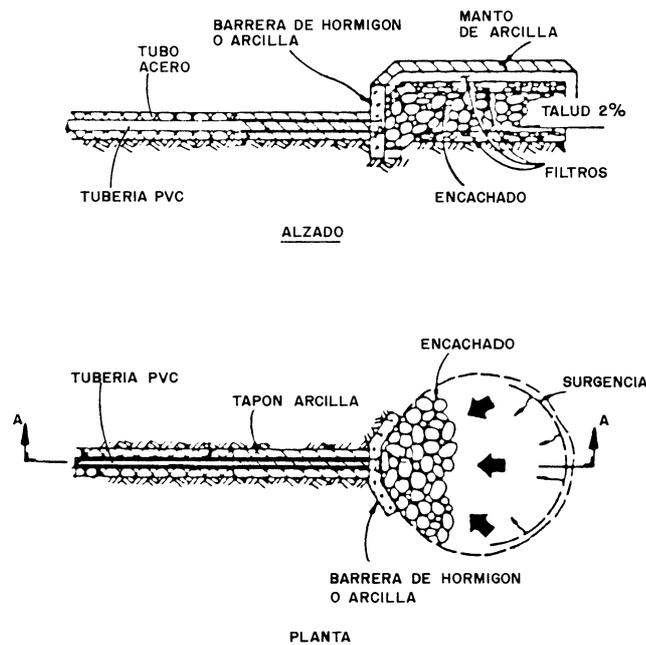


Figura 4.1. Sistema de captación de un manantial (Ayala, F.J. y Rodríguez, J.M., 1986).

Construcción de escombreras

Si las surgencias son extensas, debe disponerse de una red de zanjas o tubos drenantes conectados a unos colectores. En la Fig. 4.2 se representa la construcción de una zanja de drenaje del tipo denominado "Francés", que consiste en la colocación en el interior de la misma de material granular protegido por un geotextil o lámina filtrante.

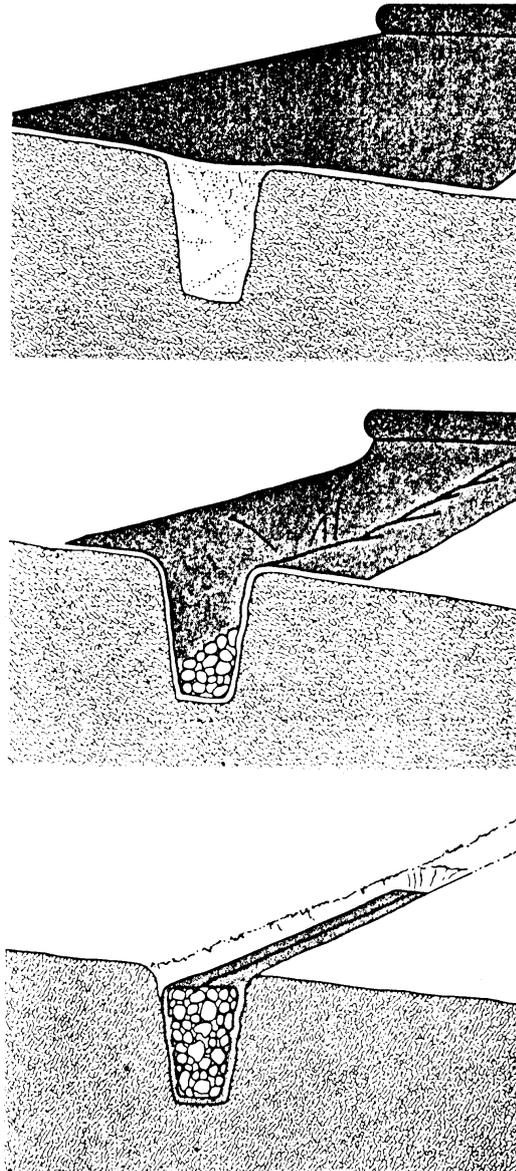


Figura 4.2. Colocación de geotextil en una zanja de drenaje (López Jimeno, C. et al, 1989).

El esquema en planta puede ser como el de la Fig. 4.3, en el que existe una cuneta general en el pie de la escombrera sobre la que se descarga el agua de drenaje a través de unos colectores principales en los que confluyen otros secundarios.

En general, cuando aparezcan elementos finos o arcillosos en los escombros a verter, no se deberán ubicar en vaguadas o zonas deprimidas, ya que, al cortar el drenaje vertical en estas zonas de mayor acumulación de agua, el flujo hacia los taludes puede crear problemas de estabilidad. Cuando alternen con los escombros

rocosos monteras terrosas, materiales alterados o muy meteorizados que puedan constituir capas impermeables, se verterán en zonas localizadas realizando un dique de material granular por delante de las mismas para garantizar la estabilidad.

Cuando las escombreras se construyan en terrenos montañosos ocupando vaguadas, se deberá proceder a la construcción previa de canales de desvío de los cauces naturales, aunque éstos sean estacionales, así como de sistemas de decantación aguas abajo de dichas estructuras.

En general, los cursos de agua superficiales que puedan afectar a las escombreras se desviarán con anterioridad a su construcción. Se llevarán a cabo los pertinentes estudios hidrológicos para calcular los caudales de máxima avenida y dimensionar así las obras de desvío necesarias. Estos estudios constituyen un capítulo esencial del proyecto de una escombrera. Las obras de desvío liberarán el área ocupada por la escombrera y, tanto el fondo como las paredes laterales, serán protegidas frente a la erosión mediante la colocación de escollera, garantizando, además, una baja permeabilidad para evitar las filtraciones.

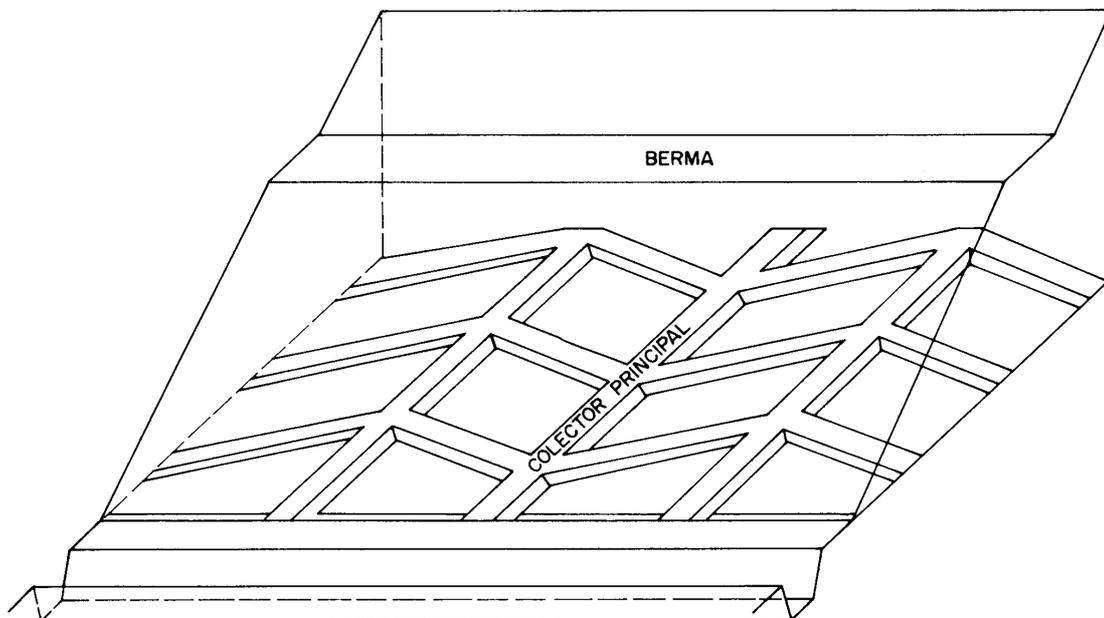


Figura 4.3. Esquema de la red de zanjas de drenaje en la base de una escombrera (López Jimeno C. et al, 1989).

Una alternativa recientemente utilizada en algunas explotaciones ha sido la de colocar drenes rocosos en las bases de las escombreras, constituidos por bloques de roca dura competente estratégicamente colocados o segregados naturalmente en el pie de los depósitos al efectuar el vertido directo de esos materiales, y a través de los cuales el agua puede circular fácilmente, Figs. 4.4 y 4.5 (Lighthall et al. 1985, y Claridge et al. 1986).

El drenaje interno del agua filtrada en el propio cuerpo de la escombrera o procedente del cimiento de apoyo debe ser objeto también de estudio. En el diseño de muchas escombreras se supone una segregación natural de los fragmentos de distinto tamaño, resultando así un drenaje efectivo a través de los fragmentos más gruesos que aparecen en el fondo de estos depósitos. Esa situación es favorable para garantizar que no va a aparecer una presión de poros en la estructura ya construida que desemboque en inestabilidades. En

Construcción de escombreras

general, también se supone que la segregación natural de las partículas producirá una zona filtro que impedirá que las partículas o fragmentos más finos migren hacia las zonas de drenaje. Si esto no se verifica, es posible que la zona de drenaje se vaya colmatando de finos, cegando los canales de circulación del agua y, consecuentemente, disminuyendo la conductividad hidráulica. En estas situaciones, se incrementarán las presiones piezométricas y disminuirá la estabilidad.

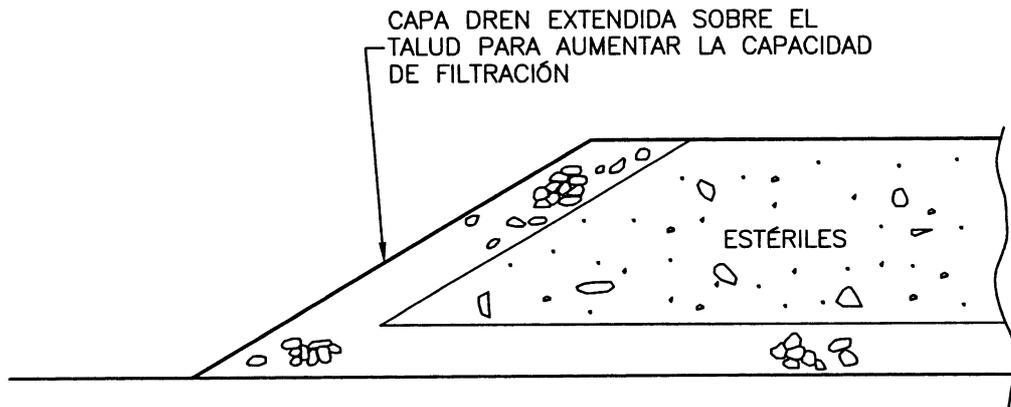


Figura 4.4. Drenaje del talud de la escombrera (Lighthall, et al, 1985).

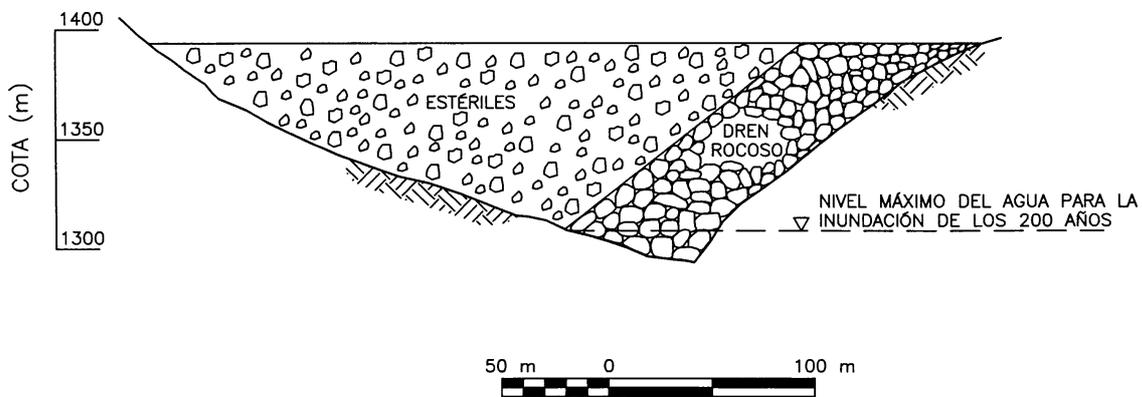


Figura 4.5. Colocación del drenaje rocoso (Claridge, et al, 1986).

La formación de una capa de drenaje con unas características de filtración adecuadas, solamente se puede obtener si el material vertido es de suficiente calidad. Los técnicos responsables deben tener estos aspectos en mente, sobre todo si un porcentaje elevado del material vertido es de roca de baja durabilidad, tales como pizarras o esquistos. En algunos casos, la planificación minera llega incluso a contemplar el vertido selectivo de estériles dentro de la propia escombrera para facilitar el drenaje interno.

La práctica de facilitar el movimiento del agua superficial a través de la escombrera por medio de drenes rocosos se suele producir cuando el caudal del flujo de agua ronda los $20 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que para caudales de $30 \text{ m}^3/\text{s}$ o más se está en fase de experimentación.

En ciertos casos es necesaria la construcción de pequeñas presas o balsas de decantación aguas abajo de las escombreras, con el fin de eliminar los sólidos en suspensión de las aguas procedentes de estas estructuras y que garanticen así unos estándares de calidad de las aguas vertidas. En estos casos esas balsas deben construirse y estar operativas antes de que se proceda a la construcción de las escombreras. Cuando sea previsible la contaminación química de las aguas, será preciso prever sistemas colectores de agua superficial y, en su caso, subterránea, para su posterior tratamiento.

Todas las medidas de control de drenajes descritos deben ser adecuadamente especificados en el proyecto de diseño de las escombreras.

Inevitablemente, la infiltración aparecerá como el resultado de las precipitaciones directas sobre la superficie de las escombreras. De manera ideal, el agua percolará a través del cuerpo de la escombrera debido a la alta permeabilidad de la capa base (formada por bloques de roca gruesa estratégicamente colocados o por la propia segregación natural) que facilitará su salida de la escombrera.

La infiltración en las plataformas de las escombreras puede minimizarse manteniéndolas con una cierta inclinación desde las crestas de los taludes de vertido hacia los canales de guarda del interior. Se debe poner especial atención para evitar que el agua quede retenida formando charcos en la superficie, o que pueda infiltrarse a través de las grietas formadas por subsidencia.

Las balsas de sedimentación dispuestas aguas abajo permitirán eliminar los sólidos en suspensión procedentes del arrastre de las partículas más finas por el agua de escorrentía que circula sobre la escombrera.

Por otro lado, el asentamiento de las escombreras deberá estar previsto en la planificación del drenaje. El grado de asentamiento final de un depósito de estériles depende del espesor del relleno, siendo invariablemente mayor cuanto más altura tenga la escombrera. Esto deberá tenerse en cuenta en la configuración final prevista de la escombrera de manera que los asentamientos no afecten a las obras de drenaje diseñadas. Estos aspectos deberán ser considerados en el proyecto de abandono y clausura de la misma.

4.3. CONTROL DE LA CALIDAD DE LOS MATERIALES

El material vertido puede variar considerablemente en su resistencia y durabilidad. Como con cualquier material ingenieril, son ideales las rocas duras y durables, y los fragmentos gruesos y angulares resistentes. En el extremo opuesto están los materiales con alto contenido de finos o que tienen una baja durabilidad y, por ello, una tendencia a romperse con el tiempo. Los materiales con un alto porcentaje de partículas de material meteorizado, o material que se deteriora con el paso del tiempo, pueden contribuir a que aparezca una variedad de problemas tales como la permeabilidad debido al cambio en el tamaño de las partículas, con un aumento de la presión de poro del agua y una menor resistencia al corte, pudiendo todo ello desembocar en una precaria estabilidad de la escombrera.

En la mayoría de las explotaciones mineras se pueden encontrar diversos tipos de rocas y materiales de recubrimiento. En algunos casos puede ser necesario una planificación estratégica del vertido de los estériles para minimizar problemas futuros. Esta planificación podría estar dirigida hacia la colocación del material de más calidad en áreas tales como:

Construcción de escombreras

S Zonas de drenaje (e. g. vaguadas, fondos de valle, etc.)

S Áreas que requieren protección frente a la erosión (e. g. canales de desvío, disipadores de energía)

S Zonas de escombrera de gran altura.

Cuando la cantidad de estériles de calidad es escasa, puede llegar a ser necesario, como parte de la planificación minera, un programa de explotación que garantice su suministro. Esto puede requerir la producción de material que cumpla unas especificaciones de calidad o, al menos, que sean de un determinado litotipo.

Se puede establecer una clasificación de la calidad de los estériles basándose en el tamaño de grano y en su composición, como por ejemplo de la forma siguiente, Fig. 4.6:

1. Calidad alta: predominancia de fragmentos de arenisca de tamaños mayores de 0,3 m.
2. Calidad media-alta: predominancia de fragmentos de arenisca y limonita de 0,2-0,3 m de diámetro y con muestras de material arenoso y gravas.
3. Calidad media: predominancia de fragmentos de arenisca y limonita menores de 0,1 m y muestras de tamaños finos.
4. Calidad media-baja: areniscas y limonitas muy fragmentadas con muestras de rocas arcillosas y finos.
5. Calidad baja: terreno vegetal, arcilla y muestras de rocas arcillosas muy fragmentadas.



Figura 4.6. Calidad de los estériles (Endicott, D.R. y Warnock, G.D., 1997).

La calidad de los estériles que aparecen en cada banco se puede estimar a partir de los testigos de los sondeos mediante la utilización de rayos gamma capaces de identificar los cambios en su composición en caso de que la inspección visual no sea definitiva. En general, la roca de calidad media y alta se suele utilizar

como material de drenaje, mientras que las rocas de calidad inferior se colocarán en zonas cuya estabilidad esté garantizada (cerca del terreno natural, entre dos escombreras construidas con materiales de alta calidad, zonas de cimentaciones planas y zonas de mezcla con materiales de alta calidad). Por lo tanto, los materiales de baja calidad no se deberán utilizar en las capas o tongadas inferiores ya que será necesario crear un pie del talud fuerte y permanente capaz de soportar el resto de los vertidos.

Cada mina tiene un modelo de yacimiento específico, que bien puede estar implementado en perfiles o secciones que representan dos dimensiones, o en modelos tridimensionales o bidimensionales de ordenador, con los que se puede interpretar las distribuciones del mineral y los estériles, y las leyes o calidades extrapoladas a partir de los datos de la investigación.

Estos modelos son revisados y actualizados una vez que las explotaciones están en operación, pudiendo ampliarse con información referente, directa o indirectamente, de los estériles, tales como dureza, velocidad de perforación, tipo de roca, fracturación, durabilidad, distribución granulométrica después de la voladura, transporte y vertido, etc. Usando estos parámetros como indicadores de la calidad de las rocas, puede elaborarse una planificación específica, una predicción de la distribución de la calidad de los materiales y sus efectos sobre la estabilidad.

Los sistemas de planificación y los modelos de yacimiento informatizados pueden usarse para evaluar la disponibilidad de materiales rocosos adecuados y la definición de las zonas de extracción, en caso de ser necesarios.

Los suelos de recubrimiento deben excluirse del material vertido en las escombreras, así como las zonas que supongan una baja resistencia al corte o zonas que dificulten el drenaje. Los horizontes superficiales serán retirados y depositados en lugares concretos. Cuando ello no sea posible, los materiales podrán ser mezclados y vertidos, conjuntamente con los estériles, siguiendo unos criterios preestablecidos. El objetivo es que los materiales más finos puedan rellenar los huecos que aparecen entre los fragmentos rocosos gruesos sin que tengan un efecto significativo sobre los parámetros resistentes del conjunto de estériles vertidos.

Normalmente los suelos deben ser mezclados de tal manera que no supongan más de un 10 % del material estéril vertido. En ningún caso los suelos deben mezclarse con estériles de mala calidad (e. g. con alto contenido de finos).

En cualquier explotación, lo ideal es emplear los suelos de recubrimiento en los trabajos de restauración, de tal manera que, si la planificación lo permite, se extiendan directamente sobre zonas modeladas que hayan llegado a su situación final, mejor que acopiarlos temporalmente o perderlos mezclados con estériles rocosos.

4.3.1. Degradación de la calidad de los materiales

En las minas donde el material estéril de baja calidad suponga un porcentaje muy alto, se deberá poner una atención especial en mantener lo mejor posible la calidad de las rocas. La calidad de los estériles puede deteriorarse por diversos factores, tanto durante el arranque como durante su vertido. Algunos de los fenómenos a tener en cuenta son:

Voladuras. Las voladuras de arranque pueden llegar a producir grandes cantidades de finos si la fragmentación por acción del explosivo es excesiva. El diseño de las voladuras puede optimizarse

Construcción de escombreras

(combinando adecuadamente las diferentes variables de diseño, esquema geométrico de la voladura, cantidad de explosivos, secuencia de encendido y tiempo de retardos, etc.) de tal manera que el material fino inferior a 50 mm se reduzca sustancialmente.

Manipulación y vertido. Cualquier manipulación mecánica de los estériles rocosos puede producir una rotura adicional de los fragmentos, al igual que sucede con un vertido violento del material. Para conseguir una degradación mínima durante el vertido, éste se puede efectuar directamente sobre el borde de las escombreras elevando las cajas de los volquetes, en lugar de depositar los estériles a unos cuantos metros del borde de las escombreras y empujar posteriormente esos materiales mediante un tractor de orugas, si bien este último procedimiento es más seguro. Si la construcción de la escombrera se hace por tongadas ascendentes que requieran compactación, se deben tener en cuenta los efectos del mayor grado de rotura. La maquinaria pesada (e. g. volquetes y tractores de orugas) que necesiten desplazarse sobre las plataformas de las escombreras también causarán un efecto de degradación de los materiales superficiales.

Algunas de las pautas a seguir para evitar una degradación excesiva del material, como consecuencia de las acciones mecánicas, son las siguientes:

- S Diseñar y modificar las voladuras para evitar la sobrefragmentación con la aparición de muchos finos.
- S Planificar los lugares de extracción y vertido para evitar la remanipulación de los materiales.
- S Usar un método de vertido lo menos intenso desde en punto de vista mecánico.
- S Usar materiales rocosos de calidad en las superficies de rodadura por las que va a circular maquinaria pesada.
- S Observar y documentar el comportamiento de los materiales para conseguir un mejor conocimiento de sus propiedades.

4.3.2. Comprobación de las propiedades de los materiales

Muchos proyectos constructivos de escombreras se basan en datos estimados de las propiedades de los materiales del cimient y de los propios escombros vertidos. Dependiendo del volumen de información disponible, el diseño puede resultar muy optimista o demasiado conservador.

Con el fin de confirmar las hipótesis de diseño, deben llevarse a cabo una serie de ensayos y verificaciones, ya que si las propiedades reales de los materiales del cimient y de los estériles evaluados durante la operación son muy distintas a las de partida, puede resultar aconsejable modificar el diseño de la escombrera. Estas modificaciones pueden así estar dirigidas tanto a solucionar posibles problemas de inestabilidad como a adoptar criterios no tan conservadores y costosos.

Los parámetros que deben ser objeto de comprobación y ensayo deben ser los siguientes:

- S Distribuciones granulométricas.
- S Durabilidad y segregación de los fragmentos gruesos que constituyen los drenajes de fondo.

S Susceptibilidad a la meteorización física y química.

S Posibilidades de aparición de niveles piezométricos y presiones de poro en el cimientó y cuerpo de la escombrera.

En este último caso es conveniente instalar, en el número y en los lugares adecuados, piezómetros para el estudio y seguimiento de los niveles freáticos.

A modo de ejemplo se pueden observar las Fig. 4.7 y 4.8. La granulometría que viene representada en la primera de ellas corresponde a materiales procedentes de la Columbia Británica (Canadá), y se puede apreciar la gran variedad de tamaños presentes en las escombreras de esta zona, que abarca desde grava arenosa hasta materiales formados por guijarros y cantos rodados que no contienen ninguna partícula de arena o grava. Esta gran variedad de tamaños y su distribución en la escombrera plantea grandes problemas para la caracterización de las mismas.

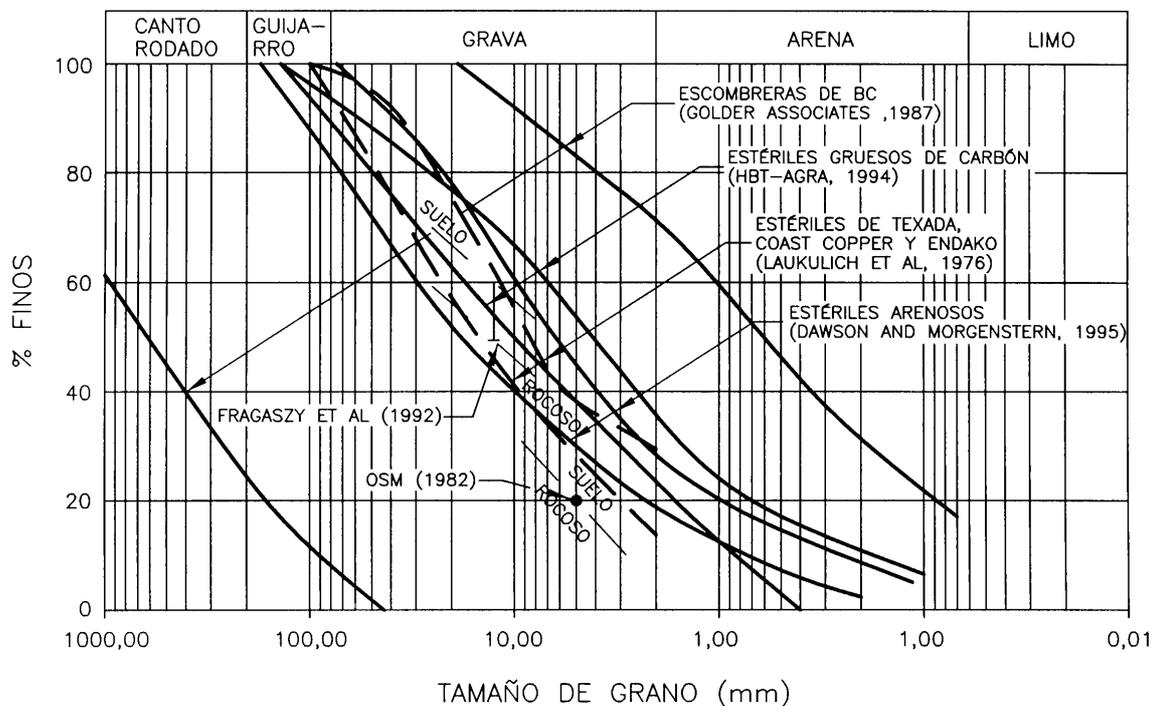


Figura 4.7. Granulometría de estériles de mina en la Columbia Británica (B.C. Ministry of Energy, 1995).

Por otro lado, la Fig. 4.8 muestra la granulometría de materiales procedentes del Reino Unido y del Este de EE.UU. La mayoría de este material está formado por partículas del tamaño de grava o menor, demostrando que la granulometría de la Columbia Británica es mucho más amplia.

En este sentido, es conveniente diferenciar los materiales con comportamiento semejante a suelos y los que se pueden asemejar a rocas. En este último caso, el comportamiento mecánico viene controlado por los contactos puntuales entre fragmentos de roca, mientras que en materiales con comportamiento semejante a un suelo, los fragmentos mayores *flotan* en una matriz de partículas menores, cuyas propiedades controlarán el comportamiento mecánico e hidráulico de la masa de suelo.

Construcción de escombreras

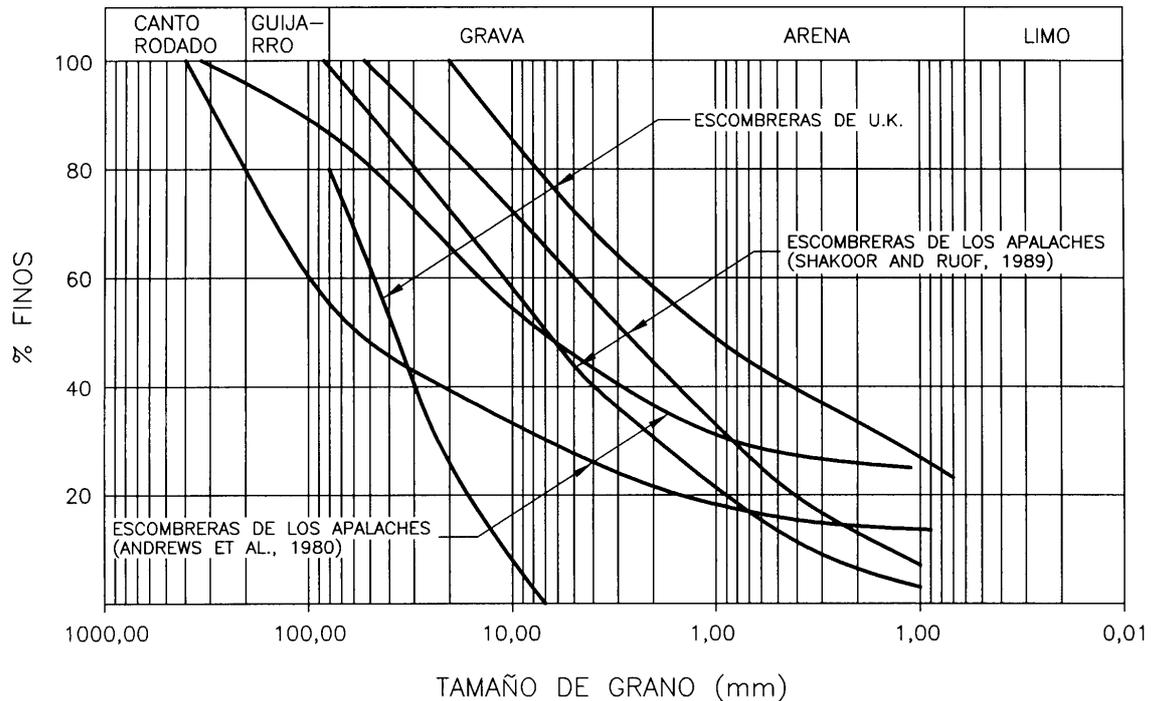


Figura 4.8. Granulometría de estériles de minas de Gran Bretaña y de la zona de los Apalaches (B.C. Ministry of Energy, 1995).

4.4. OPERACIONES DE VERTIDO

4.4.1. Procedimientos de vertido

Las normas generales de vertido son las siguientes:

- S En general, se necesitará un operador en cada una de las zonas de vertido.
- S En los casos en los que la cresta de vertido supere los 3 m de altura no se podrá verter sobre dicho banco, excepto que exista una banqueta de seguridad y un operario dirija los vehículos al punto de vertido.
- S La altura de la banqueta debe ser, al menos, igual al radio máximo de las ruedas de los volquetes de transporte.
- S La banqueta de seguridad tiene la función de servir de guía y no se debe utilizar como un tope sobre el que apoyarse.
- S La superficie de la banqueta se debe construir y mantener con una cierta inclinación hasta llegar al punto de vertido para evitar que los volquetes caigan en el frente de la escombrera. Dicha superficie debe tener una inclinación de un 2 %, aproximadamente.
- S Cuando dos o más volquetes están vertiendo al mismo tiempo, se deberá guardar una distancia de seguridad equivalente, al menos, al ancho de dos volquetes.

- S Si no existe ningún operario en la escombrera, los volquetes deben verter su carga sin alcanzar la cresta de la banqueta y, posteriormente, ésta será empujada por un tractor hasta el frente de vertido.

El esquema de una plataforma de vertido y los principales procedimientos del mismo se representan en las Figs. 4.9 y 4.10 siguientes.

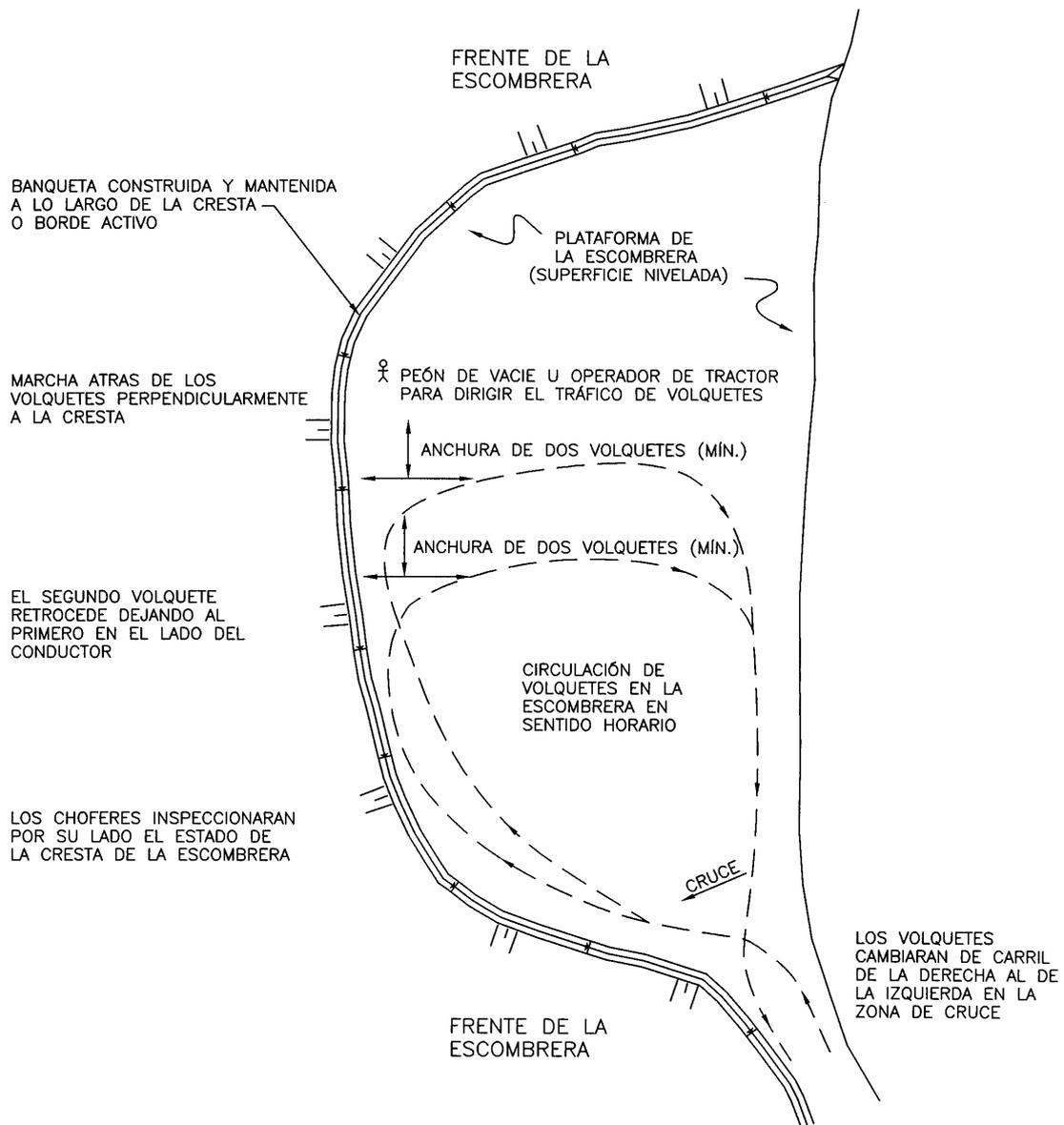


Figura 4.9. Configuración de una plataforma de vertido (BCMWRPRC, 1991).

Los procedimientos que deben seguir los vehículos de transporte en el vertido de materiales serán los siguientes:

- S Cuando un operario esté asignado en una zona de la escombrera, los conductores deben seguir sus indicaciones mientras estén en la plataforma de vertido.

Construcción de escombreras

- S La circulación de los volquetes en la plataforma de vertido se realizará en el sentido de las agujas del reloj para que la visión de la escombrera por parte de los conductores sea nítida antes de llegar a la misma.
- S Cuando el volquete llegue a la escombrera, el conductor debe detenerlo para cerciorarse de las condiciones de la banqueta, del personal y de otros vehículos. El área de la escombrera debe ser segura y estar despejada.
- S Los vehículos de transporte avanzarán marcha adelante hasta llegar al punto de vertido en el que deberán de dar la vuelta.
- S Normalmente, las rocas de grandes tamaños serán sometidas a destrucciones secundarias. En cualquier caso, los camiones que transportan este tipo de material deben seguir las siguientes recomendaciones (ver Fig. 4.10):

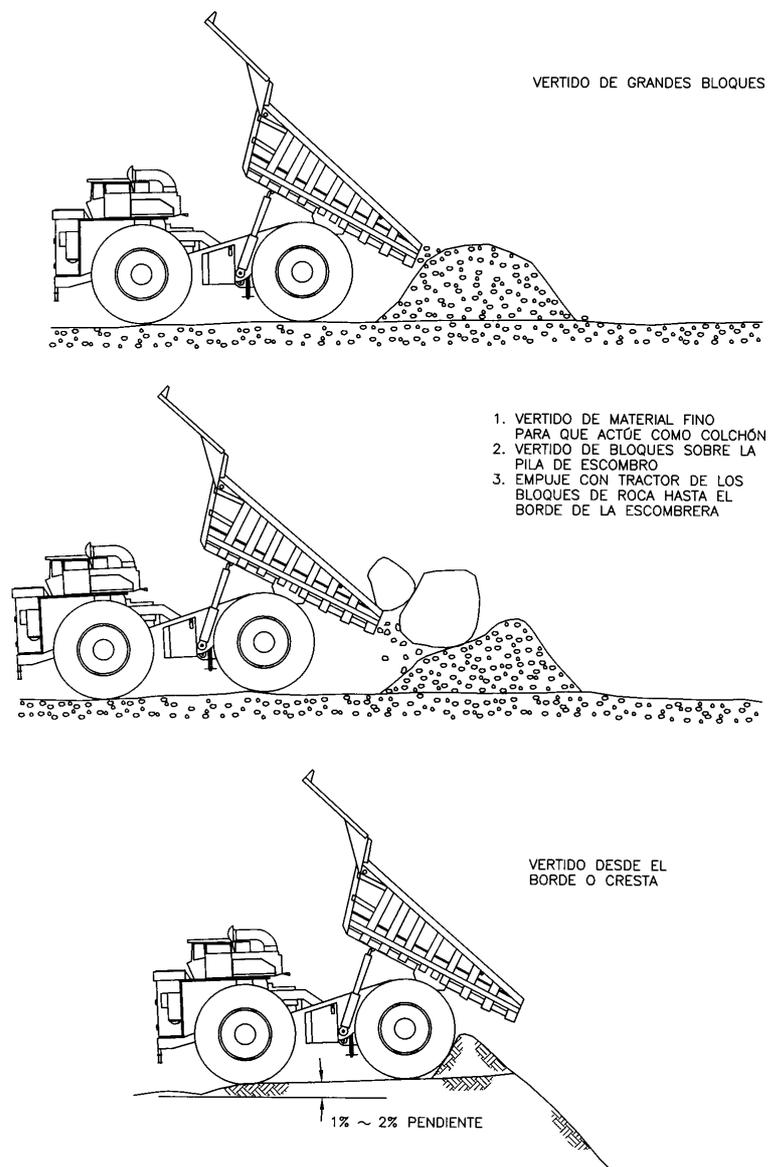


Figura 4.10. Procedimientos de vertido (BCMWRPRC, 1991).

- En primer lugar, se deberá utilizar material fino que amortigüe la caída de los bloques de roca mayores.
- Los bloques rocosos más grandes se deberán apoyar en un lecho de material fino.
- Para ello, el operario deberá señalar la parada del volquete en el momento en el que la caja esté alineada con el lecho.
- Se producirá el vertido de las rocas sobre los finos.
- Cuando el volquete haya abandonado el área de vertido, un tractor empujará el material hasta el borde de la berma.
- Durante todo el proceso, el operario debe estar suficientemente apartado de la descarga por motivos de seguridad.

S Los volquetes cargados deben estar situados en el sitio correcto.

S Los volquetes deberán dar la vuelta para situarse en la banqueta en el momento que indique el operario.

S Los volquetes no abandonarán la banqueta hasta que la caja no se haya vaciado.

S La carga debe ser vertida de una vez.

S Los volquetes no se deberán mover hasta que la caja no esté completamente vaciada.

Los tractores son usados en la escombrera para realizar el mantenimiento de la superficie de vertido y de la berma de seguridad, además de empujar el material hasta el borde de vertido cuando sea necesario. Los tractores más utilizados son los de orugas y, también, los de ruedas con hoja de empuje. En estos últimos se suelen lastrar los neumáticos introduciendo en ellos una solución de cloruro cálcico.

En ciertos momentos, una o más cargas deberán ser vertidas antes de llegar a la cresta, para proporcionar el material suficiente como para realizar las tareas de mantenimiento de la banqueta y conservar la inclinación de la superficie.

En algunos casos, pueden producirse confusiones entre el operario y el conductor del tractor, por lo que deben existir una serie de señales que sirvan para la comunicación inequívoca entre ambos.

El correcto comportamiento de los conductores de los tractores y el respeto de las normas de tráfico será responsabilidad del encargado de la escombrera.

Los operarios deben contribuir a mantener la eficiencia y seguridad de la escombrera en los temas relativos al tráfico y en las distintas tareas de operación. Su presencia constante en la escombrera, hace de los operarios el personal adecuado para las labores de vigilancia y control de los equipos ante cualquier señal extraña. En los casos donde se requiere una especial seguridad, los operarios pueden ser responsables de su control y ejecución.

Algunas normas generales para los operarios son las siguientes:

S Además de los equipos de seguridad habituales, los operarios deberán ir equipados con chaleco fluorescente, gafas de seguridad, linterna, auriculares de protección y, si es necesario, máscaras protectoras.

S Cuando se tengan cables de emergencia para el remolque de volquetes, deben ser comprobados en cada relevo.

Construcción de escombreras

- S Los operarios siempre estarán situados en el lado del conductor del vehículo.
- S Los operarios nunca cruzarán por delante o por debajo de los vehículos de transporte, siempre por detrás y con extremada precaución en caso de ser necesario.
- S Mientras un volquete está vertiendo, el operario deberá permanecer, al menos, a una distancia de seguridad equivalente a dos vehículos, y a la vista del conductor.
- S Debe vigilar la posible caída de rocas mientras la caja del volquete está elevada.

Se debe adoptar una serie de señales manuales que el operario debe utilizar para dirigir el tráfico y los conductores. Para evitar cualquier confusión, estas señales deben ser perfectamente comprensibles y deben ser conocidas por todas las personas implicadas en la operación. Según aparece en la Fig. 4.11 las señales más importantes son las siguientes:

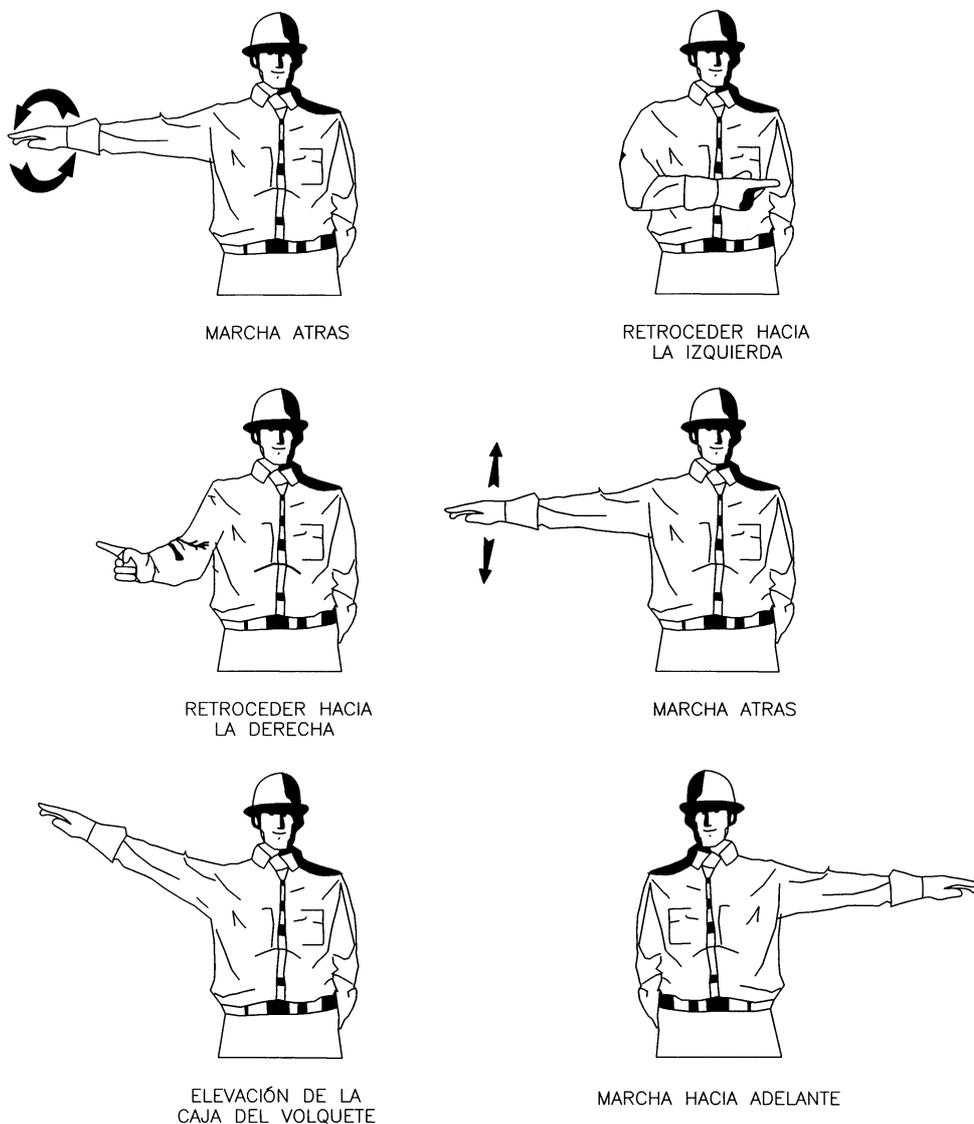


Figura 4.11. Señales utilizadas por los operarios para la organización del tráfico (BCMWRPRC, 1991).

- S **Marcha atrás:** Extender completamente el brazo derecho hacia ese lado y moverlo circularmente en el sentido de las agujas del reloj.
- S **Retroceder hacia la izquierda:** Extender el brazo derecho hacia la izquierda por delante del cuerpo. Cuando la dirección es correcta se realizará la señal anterior.
- S **Retroceder hacia la derecha:** Extender el brazo derecho hacia adelante y a la derecha. Cuando la dirección es correcta se realizará la primera señal.
- S **Parada:** Cuando el volquete haya alcanzado la posición de vertido o deba parar, el brazo derecho se extenderá completamente hacia ese lado, moviéndolo arriba y abajo varias veces para indicar la parada.
- S **Elevación de la caja del volquete:** Cuando el volquete se haya situado en la posición correcta, se podrá iniciar el vertido cuando al operario eleve y extienda su brazo derecho.
- S **Marcha hacia adelante:** Mantener el brazo izquierdo en forma horizontal, apuntando en la dirección que se debe tomar.

4.4.2. Áreas de vertido alternativas

El mantenimiento de diferentes áreas alternativas de vertido asegura la flexibilidad de las operaciones. En aquellos casos en los que las escombreras pierdan su estabilidad y se tengan que cerrar temporalmente, la disponibilidad de localizaciones alternativas puede ser muy importante. Otra posible solución a este problema se basa en la construcción de una tongada sobre la plataforma de vertido, Fig. 4.12, asegurándose que está situada sobre una zona estable, a una distancia suficiente de la zona que ha originado la inestabilidad de la escombrera.

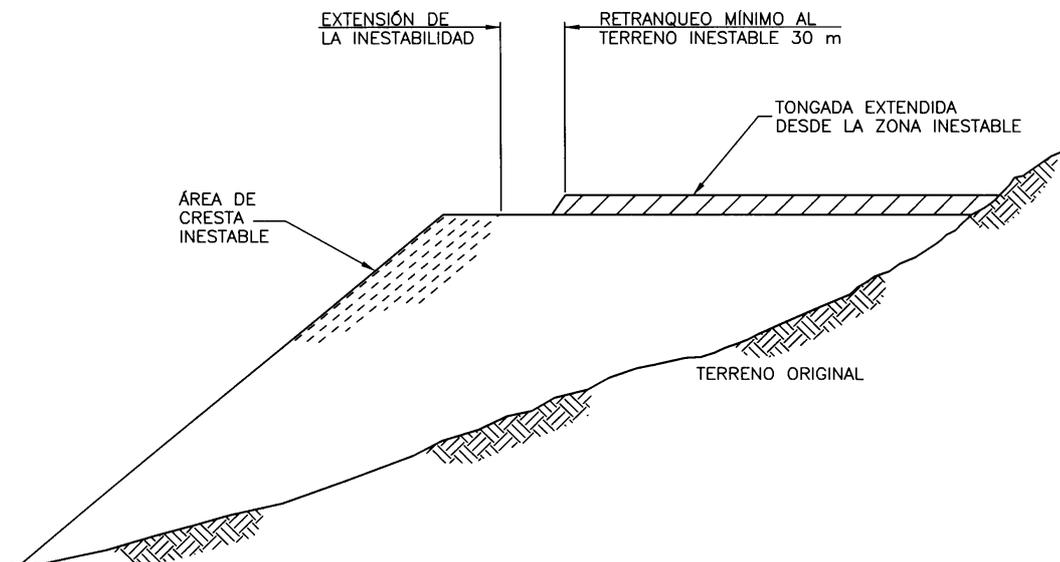


Figura 4.12. Vertido alternativo a partir de la construcción de una plataforma estable (BCMWRPRC, 1991).

4.4.3. Ritmos de descarga

Los ritmos de descarga se suelen expresar en términos de volumen vertido por metro lineal de cresta y día ($m^3/m/día$), o en metros de cresta por día ($m/día$), siendo más habitual ésta última.

Construcción de escombreras

En un primer momento, el material recién vertido sufre un pequeño asentamiento, manteniendo el estado suelto inicial. Debido a las siguientes descargas este material quedará enterrado, incrementándose la tensión de carga, por lo que el material adoptará una configuración más densa y una mayor resistencia al corte. Por lo tanto, para estudiar la estabilidad será necesario conocer el asentamiento final de la superficie de la escombrera.

Existe una importante relación entre el ritmo de descarga y la estabilidad de la escombrera, tal como se ha podido observar en ciertos casos estudiados. Sin embargo, también existen otros factores que actúan en la estabilidad y que hacen que no sea fácil determinar unos ritmos de descarga generales. Entre dichos factores destacan los siguientes:

- S **Condiciones piezométricas:** La descarga rápida de material saturado de grano fino incrementa el nivel piezométrico, disminuyendo la tensión efectiva. Con el tiempo, el terreno consolida, permitiendo una disminución de la presión intersticial que hace aumentar la tensión efectiva y la estabilidad.
- S **Características del material vertido:** El aumento de densidad que experimenta el material al colocar sobre él nuevas capas de vertido, produce un aumento en la estabilidad debido al incremento en la resistencia al corte. Si el vertido se realiza con altos ritmos de descarga, puede que no se guarde el tiempo suficiente como para conseguir la densidad y resistencia al corte adecuados como para asegurar la estabilidad.
- S **Altura de vertido:** Para un ritmo de descarga dado (m/día), una mayor altura de vertido implica una mayor cantidad de material. Por tanto, la tensión del material vertido y de la cimentación será mayor.

Con el fin de intentar obtener una relación útil entre el ritmo de descarga y la altura de vertido a pesar de la gran cantidad de variables que aparecen, se ha realizado un estudio a partir de datos obtenidos en 36 escombreras en Canadá. Con dichos datos se ha construido el gráfico de la Fig. 4.13, representando el ritmo de descarga (m/día) en ordenadas y la máxima altura de vertido (m) en abscisas. No aparece una separación clara entre escombreras estables e inestables, aunque se puede trazar una curva (límite inferior de rotura) de forma que la mayoría de las escombreras que han sufrido rotura se sitúen por encima y las escombreras estables se localicen por debajo. No obstante, se recomienda utilizar una segunda curva (curva de seguridad) también definida en el gráfico, en la que se modifica la curva del límite inferior de rotura para proporcionar una mayor seguridad.

Mediante la observación de este gráfico se puede apreciar que existen casos especiales, como aquél en que la altura de vertido supera los 140 m, y para el que el ritmo de descarga a utilizar será excesivamente bajo. En este caso será necesario realizar análisis rigurosos y programas de vigilancia.

En relación con el ritmo de vertido se deberá tener en cuenta la influencia de la tensión de carga y de la resistencia al corte, cuyos valores pueden ser modificados por la degradación de las partículas. Otros factores que pueden influir en la estabilidad de la escombrera pueden ser: la estación del año, nivel de precipitaciones, vibraciones del terreno, ángulo del talud, etc.

4.4.4. Control de la nieve

Además de las obvias dificultades operativas que presenta la caída y acumulación de nieve en invierno, se deben considerar ciertos aspectos geotécnicos.

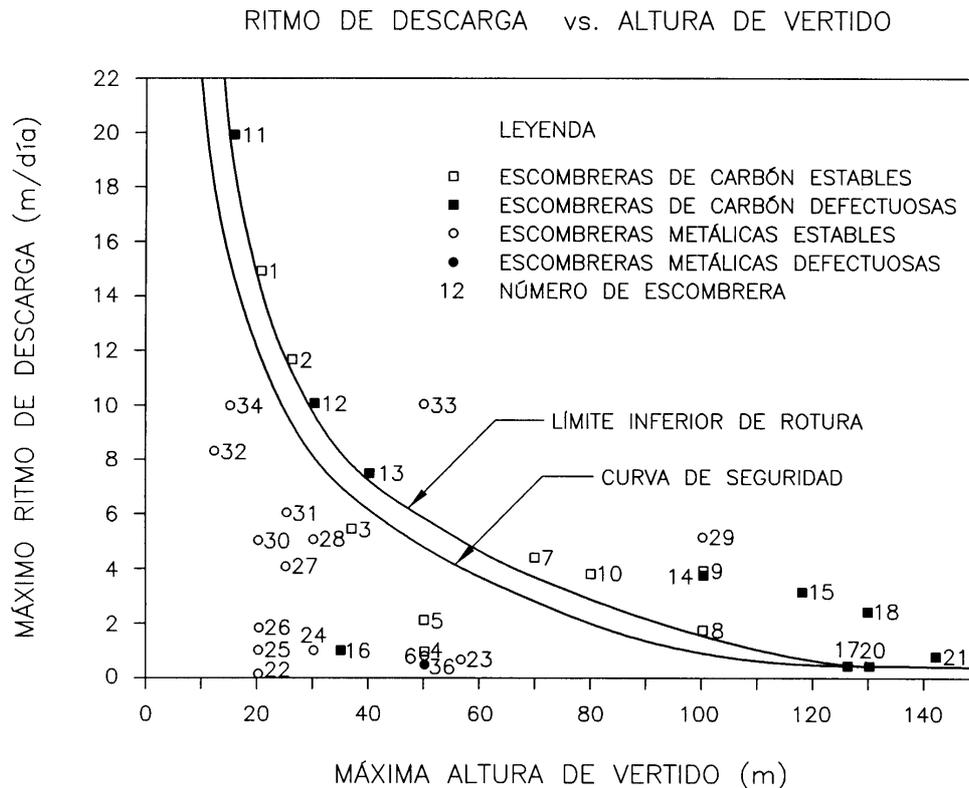


Figura 4.13. Ritmo de descarga vs. altura de vertido (British Columbia, 1991).

Se deberá evitar la acumulación de nieve en el talud de vertido, ya que un recubrimiento de nieve puede conducir a la aparición de zonas inestables debido a su falta de resistencia. Cuando esta nieve es superficial no suele haber problemas ya que posteriores vertidos cubrirán los huecos vacíos, sin embargo, cuando la capa de nieve es más potente, aparecen lentejones que provocarán inestabilidades cuando la nieve se funde.

El espesor máximo que la capa de nieve puede alcanzar sin producir problemas depende de la granulometría de las partículas del material vertido o del grado de compactación de la nieve.

La nieve transportada desde la plataforma de vertido se deberá situar en áreas especiales separadas de las áreas de vertido activas. En aquellos casos en que esto no sea posible, se podrá operar de la siguiente forma:

- S Verter en zonas donde la estabilidad sea menos crítica.
- S Verter en áreas que proporcionen una mayor estabilidad por la construcción de soportes físicos.
- S Verter en la zona del pie del talud de vertido, y de forma paralela al valle.
- S Verter en capas horizontales.

4.5. MÉTODOS Y SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

En el diseño de una escombrera se deben tener en cuenta una serie de consideraciones para determinar las distintas zonas de vertido, así como maximizar la longitud de la cresta de la escombrera. Esta planificación presenta dos ventajas:

Construcción de escombreras

- S Si aparece una superficie de rotura en una zona del depósito o la subsidencia de la cresta es excesiva, las operaciones en esta parte de la escombrera pueden ser suspendidas hasta alcanzar condiciones estables.
- S Si se puede verter sobre una gran longitud de cresta de talud, el ritmo de avance disminuirá, reduciéndose la carga aplicada sobre la cimentación y la correspondiente generación de altas presiones intersticiales en la zona del pie. Un ritmo lento de avance también permite una mayor consolidación de los materiales y un aumento en su resistencia al corte.

Los tipos de escombreras que pueden distinguirse de acuerdo con la secuencia constructiva de las mismas en terrenos con pendiente, que es el caso más habitual, son cuatro: vertido libre, por fases adosadas, con dique de pie y por fases superpuestas, Fig. 4.14.

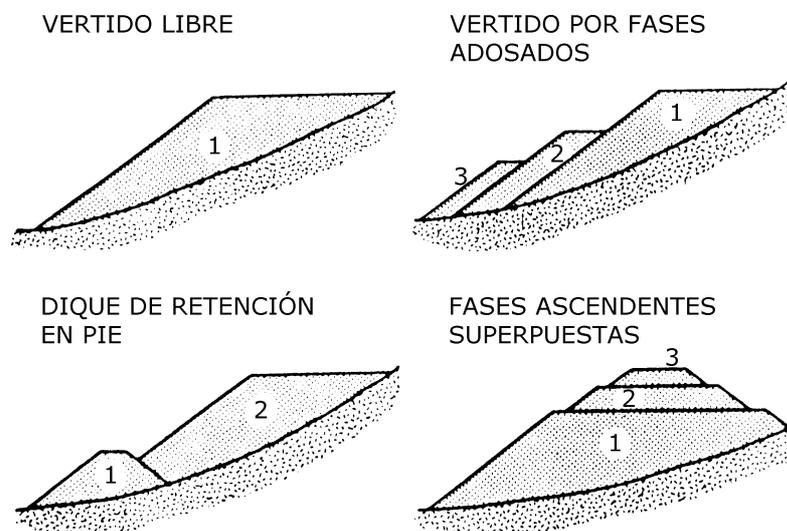


Figura 4.14. Tipos de escombreras según la secuencia de construcción (López Jimeno, C. et al, 1989).

La formación con vertido libre sólo es aconsejable en escombreras de pequeñas dimensiones y cuando no exista riesgo de rodadura de piedras aguas abajo. Se caracteriza por presentar en cada momento un talud que coincide con el ángulo de reposo de los estériles y una segregación por tamaños muy acusada. De los cuatro tipos es el más desfavorable geotécnicamente, aunque ha sido el más utilizado hasta épocas recientes.

Las escombreras con fases adosadas proporcionan unos factores de seguridad mayores, pues se consiguen unos taludes medios finales más bajos. La altura total puede llegar a suponer una limitación por consideraciones prácticas de acceso a los niveles inferiores.

Cuando los estériles que se van a verter no son homogéneos y presentan diferentes litologías y características geotécnicas, puede ser conveniente el levantamiento de un dique de pie con los materiales más gruesos y resistentes, de manera que actúen de muro de contención del resto de los estériles depositados. Esta secuencia constructiva es la que se suele seguir en aquellas explotaciones donde se extraen grandes cantidades de materiales arcillosos o finos, cuya deposición exigiría de otro modo grandes extensiones de terreno y presentaría un elevado riesgo de corrimientos, o cuando las condiciones de la base de apoyo no sean buenas.

El tipo de fases superpuestas y retranqueadas aporta una mayor estabilidad, ya que se disminuyen los taludes finales y se consigue una mayor compactación de los materiales.

Así pues, la secuencia constructiva de una escombrera incide directamente sobre la estabilidad de tales estructuras y sobre la economía de la operación, llegando a ser preciso en algunos casos una solución de compromiso entre ambos factores.

El recrecido de una escombrera debe realizarse de la manera más homogénea posible y de ello depende en gran medida la modalidad de vertido que se elija. Normalmente, los estériles se desplazan desde las minas hasta los vertederos por cintas transportadoras o por volquetes, siendo habitual disponer de tractores para el extendido y empuje de estos materiales, así como el acondicionamiento del piso, Fig. 4.15.

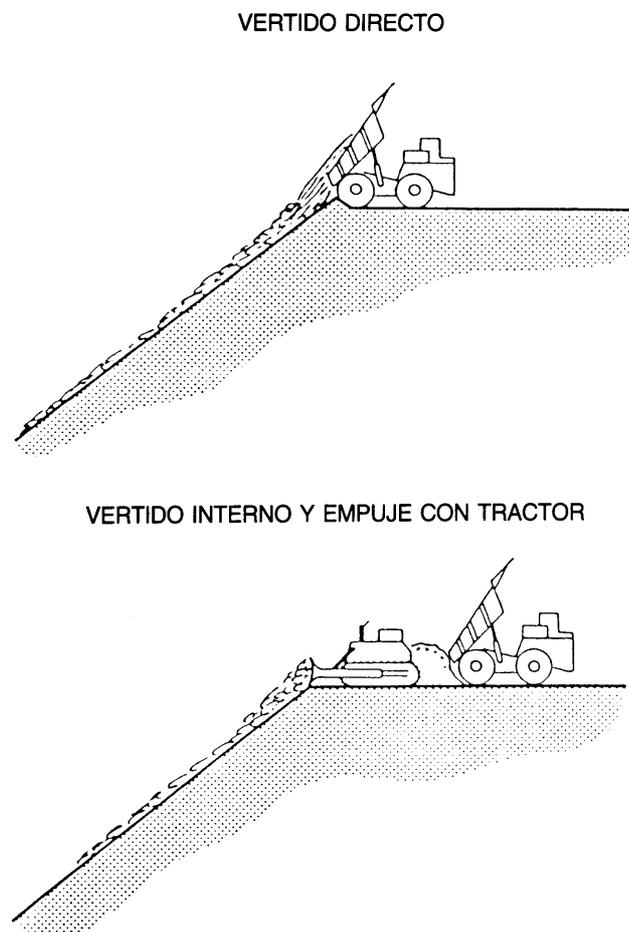


Figura 4.15. Vertido libre con equipo de transporte y con ayuda de tractor empujador (López Jimeno, C. et al, 1989).

Estos equipos permiten, en el caso de los volquetes, operar en unas mayores condiciones de seguridad, ya que estas últimas unidades no tienen que posicionarse al borde de los taludes, mientras que en los casos en que se utilicen cintas, permite disminuir los alargamientos y los cambios de ubicación de las mismas. Al mismo tiempo, se aminora el fenómeno de segregación con respecto al que se produce con el vertido libre.

Construcción de escombreras

En estrecha relación con el procedimiento de vertido se encuentra el método de construcción, que puede ser: por basculamiento final o en retroceso por tongadas, Fig. 4.16.

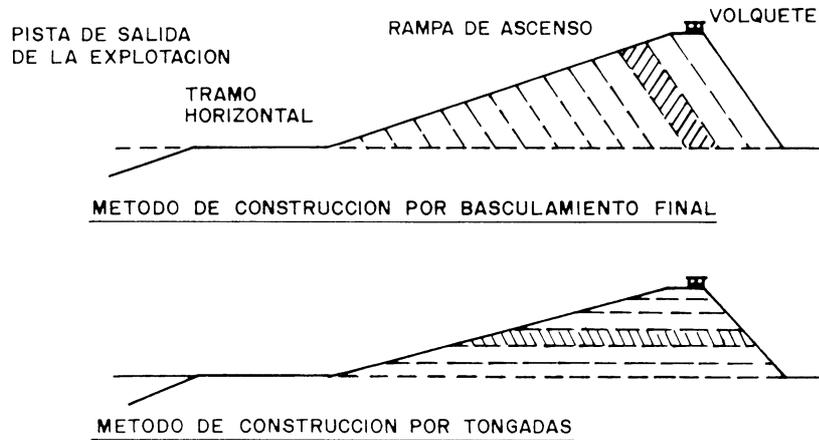


Figura 4.16. Métodos de construcción por basculamiento final y por tongadas (López Jimeno, C. et al, 1989).

El método de basculamiento final consiste en descargar los estériles desde una gran altura, consiguiendo las condiciones de drenaje por la segregación natural que sufre el material durante el descenso por rodadura, Fig. 4.17. Los bloques grandes se encontrarán en el pie del talud, disminuyendo la granulometría en sentido ascendente.

Sin embargo, existen factores que impiden alcanzar las condiciones de estabilidad deseadas:

1. Con rocas friables o poco resistentes a los choques y rozamientos (pizarras o esquistos) no se produce una segregación clara y suficiente, que permita un correcto drenaje de la masa de material que sustentan.
2. Si el material es depositado en la plataforma de vertido y empujado hasta el borde del talud, se dificultará la diferenciación granulométrica y se crearán superficies planas compactadas y paralelas al talud general de avance, pudiendo actuar como planos de rotura por la escasa resistencia al corte en estas zonas.
3. El vertido por gravedad proporciona ángulos de reposo con un coeficiente de seguridad próximo a 1. En rocas sedimentarias estos ángulos se aproximan a 37° . Por ello, y con el fin de garantizar las condiciones de estabilidad durante lluvias prolongadas, se recomienda tener un talud general de unos 20° .
4. Las escombreras construidas con este método son más susceptibles a la erosión por las aguas de escorrentía a pesar de mantener taludes inferiores, pues las superficies son largas e ininterrumpidas, sin bermas o terrazas intermedias, y los taludes no pueden protegerse con vegetación hasta que se complete la construcción de la escombrera.

El método por tongadas consiste en depositar y compactar los estériles en capas o tongadas, con lo que se aumenta notablemente la resistencia al corte y la capacidad de vertido, pues se reduce el efecto de esponjamiento. Las condiciones de drenaje se consiguen creando un núcleo central de escollera tal como se ilustra en la Fig. 4.18.

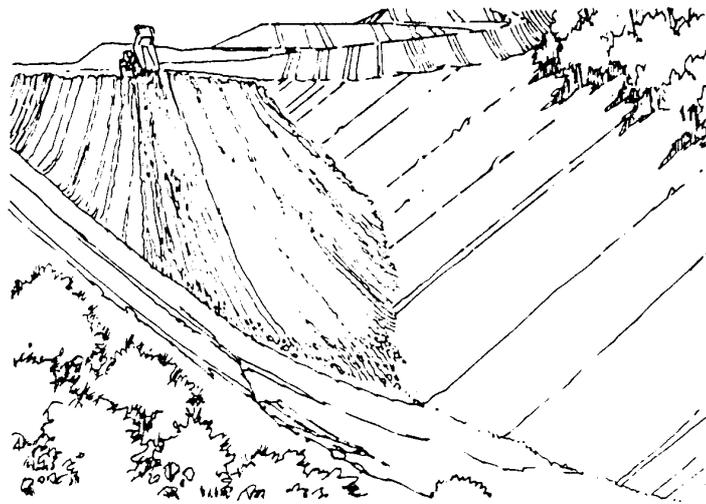


Figura 4.17. Escombrera de vaguada con vertido por gravedad (Robins, J.A., 1978).

Construcción de escombreras

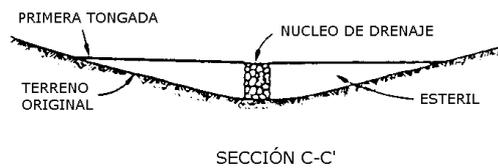
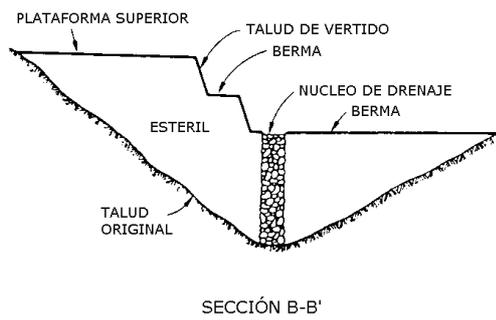
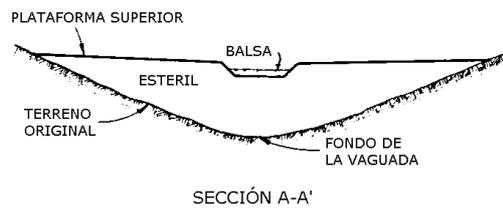
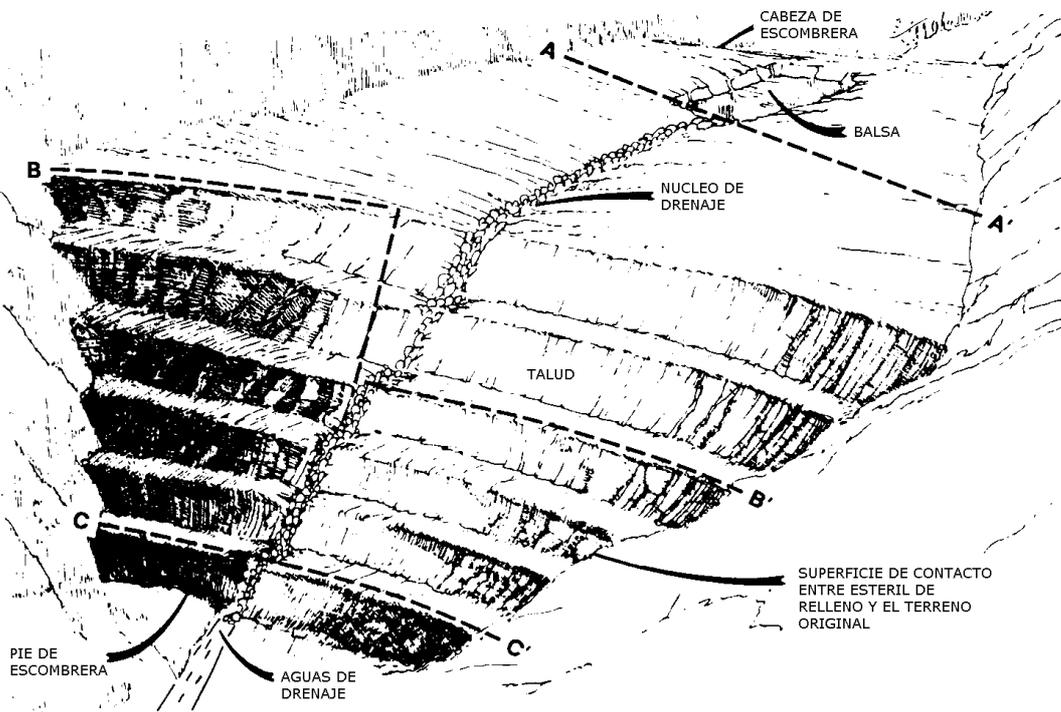


Figura 4.18. Detalles constructivos de una escombrera de vaguada con núcleo de drenaje (Chironis, N.P., 1978).

Normalmente, la mayoría de las grandes escombreras se construyen en capas gruesas formando bancos con una altura vertical de 10 m o más, Fig 4.19. Estos bancos se realizan con el fin de minimizar la distancia vertical de transporte. La estabilidad de la escombrera se puede controlar a partir del espesor y longitud de las bermas y del espaciamiento vertical entre ellas. La construcción de escombreras en banco permite disminuir el ángulo del talud total.

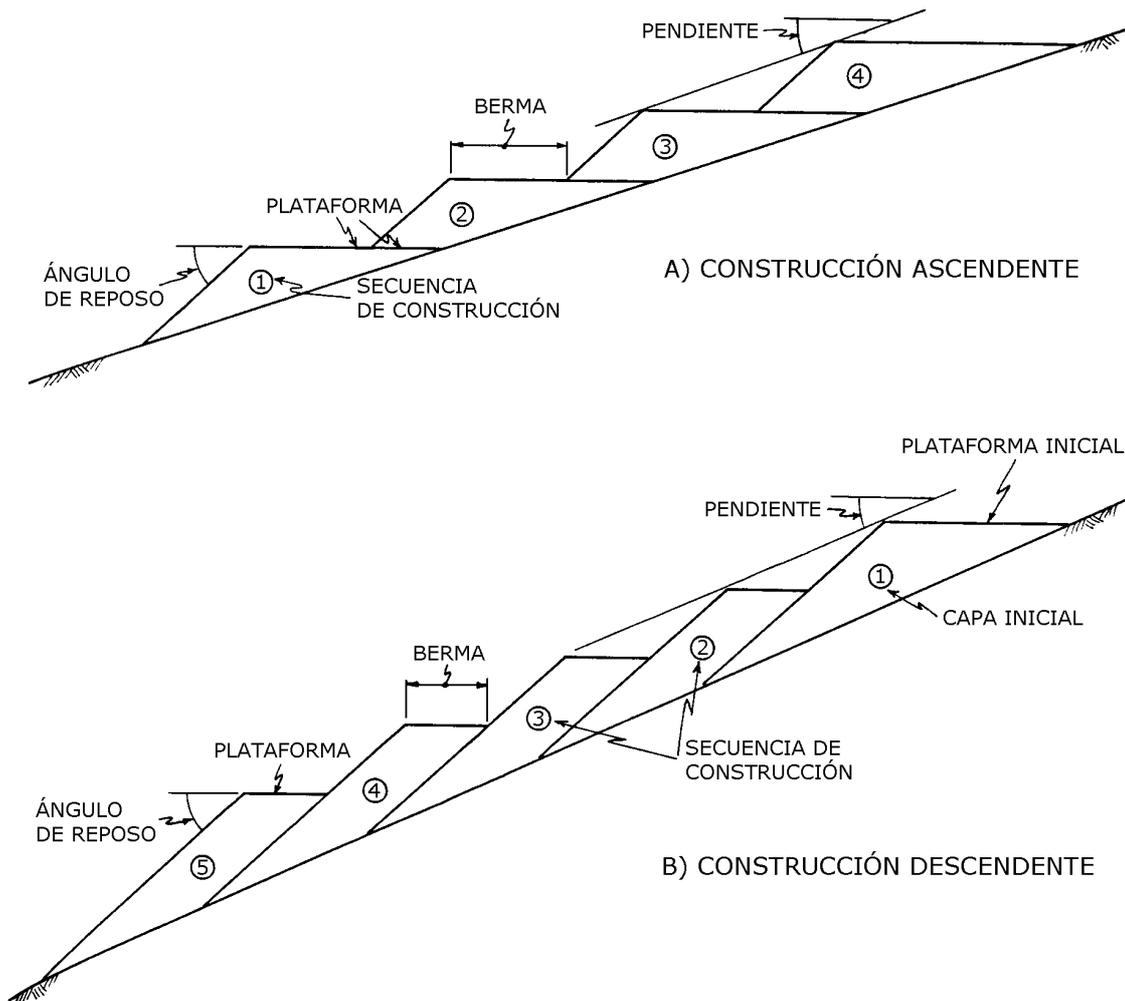


Figura 4.19. Construcción ascendente y descendente (BCMWRPRC, 1991).

Como también se puede apreciar en la Fig. 4.19, la construcción de una escombrera se puede realizar en sentido ascendente o descendente. La construcción ascendente es la más habitual debido a que, como cada capa se construye sobre otra anterior ya finalizada, su comportamiento será suficientemente conocido y documentado. Cualquier superficie de rotura se extenderá a través de las capas anteriores, por lo que este método también funciona como un refuerzo del pie del talud y produce un confinamiento del cemento, además de proporcionar siempre terreno firme para el apoyo del pie del talud.

Construcción de escombreras

Las variaciones en la pendiente del terreno situado bajo la zona de avance de la escombrera determinan, en gran medida, su estabilidad, por lo que dicho avance debe ser debidamente planificado para evitar estos problemas. Las soluciones pueden ser las siguientes:

- S Iniciar el relleno de un talud mediante el vertido sobre una hondonada del terreno para que el confinamiento que se produzca proporcione estabilidad.
- S El pie de cada capa se debe apoyar en bancos naturales o sobre terreno llano.
- S Tras el relleno inicial, el vertido se debe extender en dirección paralela al contorno.
- S Todas las hondonadas que aparezcan en el talud deberán ser rellenadas para favorecer la segregación.

La secuencia a seguir para el desarrollo de una escombrera sobre una topografía que presente una cierta inclinación se puede apreciar en la Fig. 4.20.

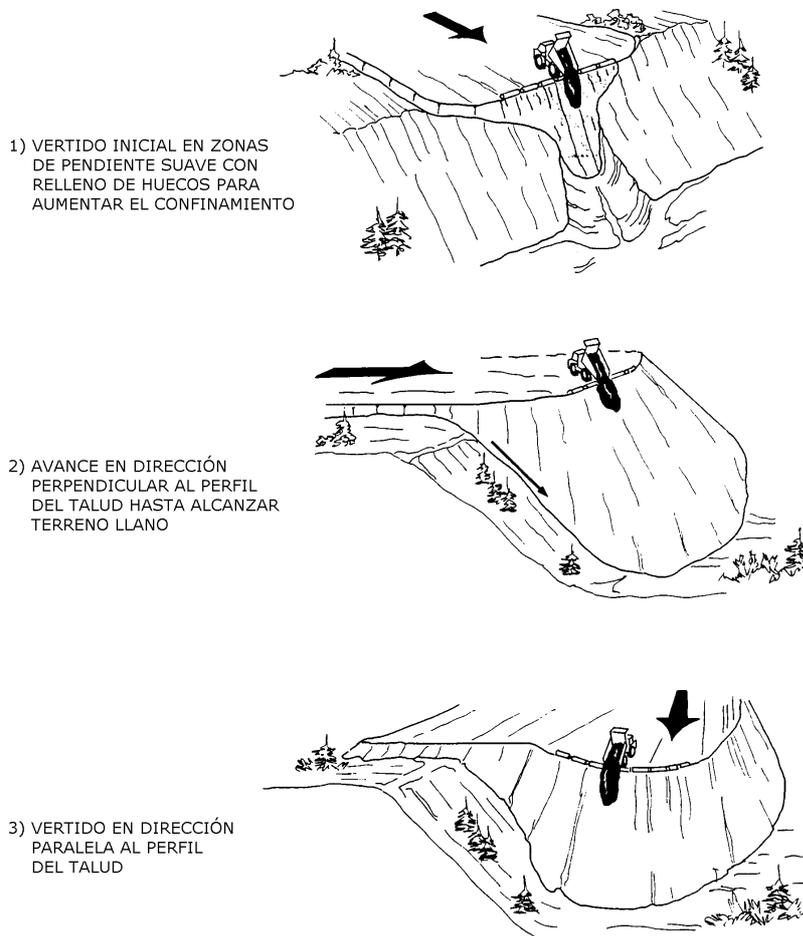


Figura 4.20. Secuencia para el avance de escombreras sobre terrenos inclinados (BCMWRPRC, 1991).

En casos donde el peligro de inestabilidad sea muy alto se podrán utilizar mecanismos de apoyo y refuerzo para que la construcción de escombreras sea factible. Para ello, se necesita un amplio conocimiento de las características del emplazamiento, así como de la magnitud de las posibles superficies de rotura y deslizamientos.

En terrenos de gran pendiente, donde el factor de seguridad frente a la rotura es bajo, la posibilidad de producirse deslizamientos es muy alta. Una medida de protección en estos casos es la construcción de una estructura de contención o apoyo sobre el pie del talud de la primera capa de la escombrera (si ésta está construida en sentido ascendente), Fig 4.20. El diseño de este pie de apoyo se basa en el aumento del factor de seguridad por el aporte de masa de tierra que contrarreste las fuerzas tendentes al deslizamiento.

Los diques de contención, Fig. 4.21, se sitúan en terreno llano tras el pie del talud final de la escombrera, lugar óptimo donde realizar sus funciones de interceptación de posibles deslizamientos, protección de instalaciones o evitar la contaminación de un río. El diseño de un dique de contención es más complicado que el de un pie de apoyo, ya que se debe conocer la masa y altura adecuadas como para prevenir los efectos producidos por una rotura. Suelen ser muy efectivas ante pequeños deslizamientos, sin embargo, la construcción de diques de contención de la suficiente masa y altura como para mitigar de forma significativa una gran rotura producida en una escombrera, no suele ser útil ni práctico.

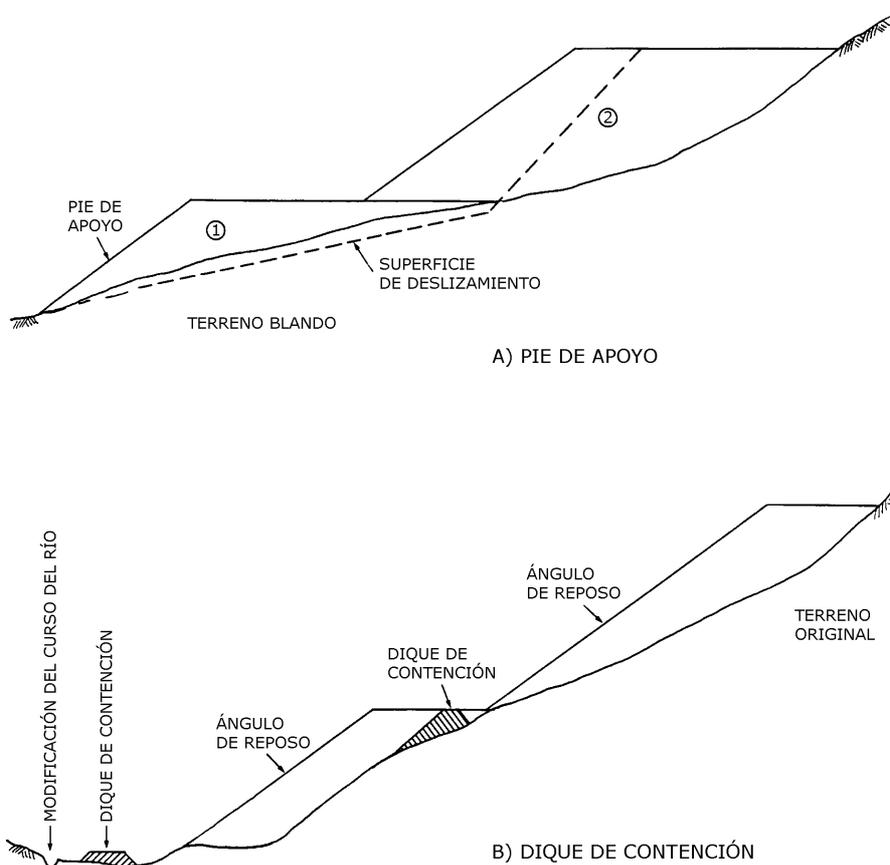


Figura 4.21. Pie de apoyo y dique de contención (BCMWRPRC, 1991).

Las normas y recomendaciones para este tipo de escombreras son las siguientes:

1. En terrenos con pendientes fuertes ($> 20^\circ$) se recomienda el levantamiento de un dique de contención de sección trapezoidal con las siguientes dimensiones:

S Profundidad: 1,5 m en material consolidado.

Construcción de escombreras

S Taludes: 1,5H:1V.

S Anchura de fondo: superior a 3 m.

En escombreras con una capacidad inferior a $0,8 \text{ Mm}^3$, este dique se puede sustituir por una plataforma de las siguientes dimensiones:

S Taludes: mayores de 1,5H:1V.

S Anchura de fondo: superior a 3 m.

2. Para aumentar la eficiencia del drenaje se recomienda, en ciertos casos, que el dique de base se construya con bloques resistentes de arenisca.
3. En escombreras de más de $0,8 \text{ Mm}^3$ de capacidad, el dique de contención puede complementarse con contrafuertes o estribos para reforzar la estabilidad de la masa de material vertido.
4. En todos los casos, además de los drenes considerados como principales, se construirán otros secundarios o laterales, de acuerdo con las recomendaciones de la Tabla 4.1:

TABLA 4.1. Medidas de los drenes secundarios.

TIPO DE ESTÉRIL	CAPACIDAD DE LA ESCOMBRERA	
	< $0,8 \text{ Mm}^3$	> $0,8 \text{ Mm}^3$
Pizarras o similares	5 m x 2,5 m	5 m x 5 m
Areniscas o similares	2,5 m x 1,2 m	5 m x 2,5 m

Fuente: Chironis, N.P. (1978).

La granulometría del material empleado en los drenajes debe ser tal que contenga menos del 10 % de bloques inferiores a 30 cm y no existir tamaños superiores al 25 % de la sección del drenaje. Tanto los drenes principales como los laterales se diseñarán de acuerdo con la valoración de los factores geológicos y topográficos característicos del lugar.

5. El procedimiento para la colocación del estéril es el siguiente:
 - a) Si el 65 % o más del material es arenisca, puede ser vertido sin compactación, pero se nivelará según la cota del banco al finalizar el relevo de trabajo.
 - b) Si el material contiene menos del 65 % de areniscas, puede ser vertido en tongadas de 1,2 m, compactándolo a continuación.
 - c) En terrenos abruptos y de fuerte pendiente y siendo más del 90 % arenisca, los sistemas de drenaje se construirán basándose en la segregación natural que se produce en el vertido.
6. Cuando las escombreras son construidas por gravedad, se recomienda compaginar el vertido en avance con el lateral, ya que de esta forma se evita la formación de planos diferenciados que puedan servir como posibles discontinuidades de deslizamiento o rotura.

7. El material de relleno se dispondrá formando bancales con el fin de incrementar la estabilidad. Se recomiendan las siguientes dimensiones finales:
- Altura de banco: 15 m máximo.
 - Anchura de berma: 6 m máximo.
 - Pendiente de desagüe hacia el interior de las bermas: 3-5 %.
 - Pendientes laterales de coronación: 3-5 %.
 - Superficie de estabilización: revegetación coexistente con la construcción.
8. Todas las superficies de drenaje dispondrán de las pendientes adecuadas hacia ambos lados de la vaguada, dirigiendo las aguas hacia las zanjas construidas en roca inalterada. Estas zanjas estarán protegidas por escollera u otros materiales en las zonas de fuertes pendientes, con objeto de reducir la velocidad de circulación.

En las escombreras de llanura construidas en retroceso y vertido en tongadas, las normas a observar son:

- Altura de banco: menor de 5 m.
- Altura de berma: no inferior a 5 m.
- Talud general: menor de 26° (2H:1V).
- Altura máxima de escombrera: 30 m si la humedad del material supera el 14 %.

Igualmente, en las escombreras de ladera se recomiendan los siguientes parámetros de diseño:

- Talud general: menor de 22° (2,5H:1V).
- Altura máxima de escombrera: 15 m.

En la base de la escombrera se levantará un dique de escollera debidamente compactado, complementándolo con una tubería de drenaje del lado de aguas arriba.

4.5.1. Construcción de escombreras con apiladores

La utilización de sistemas de transporte y vertido alternativos tales como cintas y apiladores deben tenerse muy en cuenta en aquellos casos en los que la altura de vertido sea grande, donde la rodadura de los volquetes pueda producir problemas, o donde los costes de transporte sean importantes, Fig. 4.22. También se debe considerar la gran flexibilidad que proporcionan los apiladores en las operaciones de vertido de los estériles.

En la utilización de apiladores se puede comenzar con la construcción de un dique con material de buena calidad y situada paralelamente al pie de la escombrera, para, posteriormente, rellenar el hueco existente. Para ello se utilizan dos pasadas para conseguir una altura de tongada de aproximadamente 20-25 m. La altura de vertido debe ser suficiente como para proporcionar la compactación necesaria, y que normalmente ronda los 30 m de altura. El volumen existente entre el dique inicial y el talud se puede rellenar con material de mala calidad en capas pequeñas hasta llegar a 5 m del nivel de la escombrera. Si es necesario, los últimos 5 m se rellenan con material de buena calidad para soportar los movimientos del apilador durante las fases de operación.

Construcción de escombreras

También se puede colocar un cierto volumen de escollera en la parte externa del dique inicial, nivelando con tractor de orugas una capa de rodadura de 2 m para así evitar los asentamientos de la escombrera debido a las maniobras del apilador y facilitar el drenaje de agua de lluvia. En este sentido, el piso sobre el que se desplaza el apilador se debe supervisar continuamente para controlar el desarrollo de grietas. Cuando se puedan producir deslizamientos, el apilador se debe apartar de la zona y el pie de la escombrera se podrá estabilizar usando, por ejemplo, cenizas de las centrales térmicas, que además ayudarán al secado de los estériles. Para ayudar a la estabilización de la escombrera también se puede efectuar la construcción de pozos de bombeo que disminuyan el nivel freático.

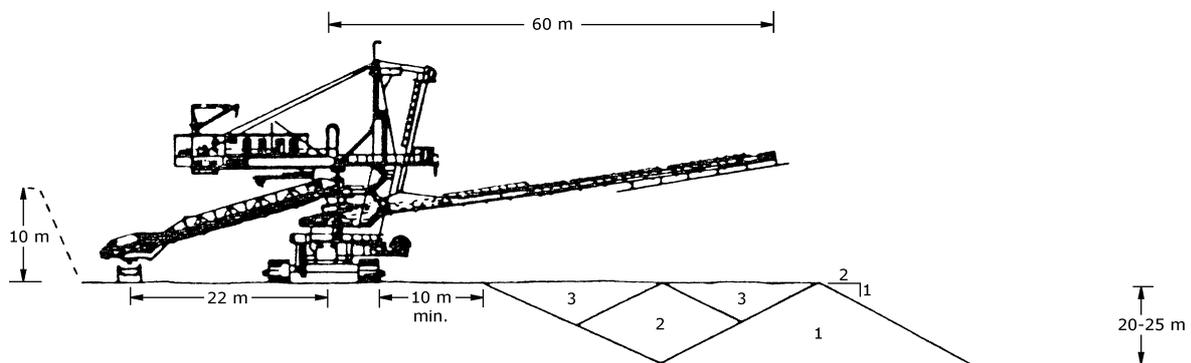


Figura 4.22. Construcción de escombreras con apiladores (Adam et al., 1985).

En la construcción de escombreras con apiladores se suele utilizar una técnica que consiste en dividir la escombrera en sentido vertical y en dos fases: la escombrera inferior y la escombrera superior. En primer lugar, se construirá la escombrera inferior, cuya zona superior será nivelada con la ayuda de tractores de orugas que facilitarán la posterior construcción de la escombrera superior. En ciertas ocasiones, la construcción de la fase superior se debe demorar un tiempo para permitir la disipación de la presión de agua.

En general, las ejecuciones de las distintas escombreras con apiladores varían entre las de buen diseño teórico a las que han evolucionado con la experiencia de la operación. En todos los casos, se requiere una disposición selectiva de los materiales para mejorar el soporte del apilador y del circuito de estéril. El material granular y estable se utiliza para mejorar el material menos estable, por lo que se requiere una programación y una flexibilidad de la operación para conseguir la disposición adecuada del material y mantener la estabilidad de la escombrera. Por lo tanto, el diseño de la escombrera estará encaminado a asegurar la estabilidad de la misma. Así, como ya se ha dicho, la altura de vertido contribuye a compactar y estabilizar los estériles, al igual que la utilización de cenizas en los pies de los taludes.

Los equipos disponibles también influyen en el diseño de las escombreras. En general, parece que los apiladores con longitud de pluma de 60 m ofrecen una economía adecuada para producciones medias, ya que el coste de adquisición de los apiladores aumenta significativamente para mayores longitudes de pluma.

Por último, el tipo de material a ser transportado, el tiempo de transporte, las proporciones de distintos materiales, sus propiedades y los caudales de vertido, determinan las alturas de vertido más adecuadas.



Foto 4.2. Construcción de una escombrera con apilador.

4.6. ESCOMBRERAS DE CONSTRUCCIÓN SELECTIVA PARA PREVENIR LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS

4.6.1. Aspectos generales

La oxidación de los sulfuros, principalmente pirita, es un proceso natural debido a la exposición de los minerales a las condiciones atmosféricas. Como resultado se producen aguas ácidas que pueden suponer la contaminación del medio ambiente. Normalmente, la producción de estas aguas ácidas ocurre tras la filtración de agua a través de depósitos de estériles ó balsas de residuos.

Las actividades de extracción mineras tienden a producir un aumento en la generación de aguas ácidas, debido a que los minerales se parten, aumentando de esta forma su superficie libre, y acelerando los procesos de meteorización.

Los principales factores que influyen en esta oxidación son los siguientes:

- S Disponibilidad de agua para la oxidación y el transporte.
- S Disponibilidad de oxígeno.
- S Características físicas de los materiales.
- S Temperatura.
- S pH.
- S Equilibrio de iones ferroso/férrico.
- S Actividad biológica.

Construcción de escombreras

Cuando la oxidación se produce en ausencia de actividad bacteriana, la reacción se denomina abiótica y, en caso contrario, biótica. La oxidación de la piritita se acelera ante la presencia de la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* y *Thiobacillus thiooxidans*. Además, su máxima oxidación aparece cuando el pH se sitúa entre 2,4 y 3,6, disminuyendo rápidamente cuando se superan estos márgenes. Bajo condiciones ácidas, el hierro férrico es, en sí mismo, un potente oxidante capaz de atacar a los sulfuros.

Como el agua y el oxígeno son los principales factores que rigen la producción de aguas ácidas, el aislamiento del material, como la encapsulación, es una medida para reducir su disponibilidad, pero no siempre es efectivo a largo plazo.

Otro factor importante que influye en el proceso de oxidación es la existencia de otros minerales que puedan neutralizar los ácidos. Los carbonatos son los únicos minerales que, de forma natural, pueden controlar y prevenir de manera efectiva las aguas ácidas.

Las condiciones climatológicas determinan el impacto de las aguas ácidas, siendo las precipitaciones y la temperatura los principales factores. La humedad limita en cierta manera las reacciones de oxidación, sin embargo, la escorrentía y la infiltración del agua de lluvia son los principales mecanismos para el transporte de productos oxidantes en el ambiente. Como la oxidación de los sulfuros es menor en el agua que en el aire, la saturación de estos minerales ofrece un mejor control de la producción de aguas ácidas.

En climas húmedos, el control del agua ácida puede permitir su adecuada dilución hasta alcanzar los límites exigidos para que la peligrosidad sobre el medio ambiente desaparezca. En climas secos, el transporte de agentes oxidantes es mínimo, y puede ser relativamente controlado mediante procesos geoquímicos.

La naturaleza física de los estériles también determina la generación de ácido, de forma que la oxidación de los sulfuros se limite mediante compactación, tamaños de grano fino y depósitos meteorizados. Las aguas ácidas son función de las características de los materiales, tales como su granulometría, dureza, resistencia a la meteorización y permeabilidad.

En referencia al aspecto de la compactación, se ha comprobado que los tractores no consiguen una compactación óptima si siguen un sentido descendente del talud, ya que tienden a empujar el material. Además, pendientes iguales o mayores de 1V:4H son demasiado elevadas como para garantizar la suficiente seguridad. Estas dificultades se evitan si la escombrera adopta una configuración en terrazas, Fig. 4.23, que reduzca la pendiente efectiva de 1V:4H a 1V:5H, permitiendo al tractor el desplazamiento a lo largo del talud a velocidad óptima. Cada banco compactado se superpone al banco que lo antecede, produciendo una zona de compactación continua desde el pie hasta la cresta de la escombrera. La cara libre de cada banco se protege con rocas para minimizar la erosión, construyendo una berma para facilitar el drenaje. El diseño en terrazas reduce la erosión general del conjunto y permite un fácil acceso para la realización de la siembra y el mantenimiento.

4.6.2. Medidas de control de aguas ácidas en escombreras

La prevención y el control de las aguas ácidas es un aspecto muy importante en aquellas minas donde existan sulfuros. Conociendo el posible riesgo de producir aguas ácidas se deberá establecer el diseño, desarrollo, operación y clausura de las explotaciones que den como resultado una serie de beneficios ambientales y económicos.

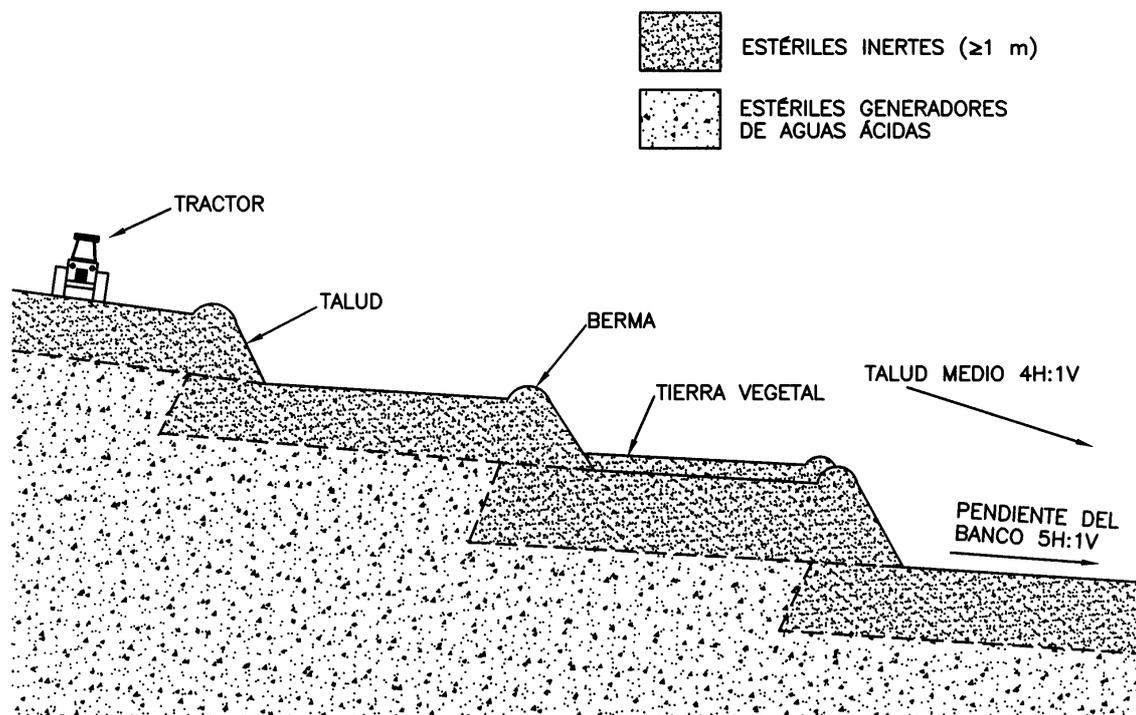


Figura 4.23. Compactación del talud de una escombrera (Environment Australia, 1997).

Las aguas ácidas presentan los siguientes inconvenientes referentes a la explotación minera:

- S El impacto sobre la calidad del agua de mina limita su reutilización creando problemas de corrosión de infraestructuras y equipos.
- S Modificación de la calidad del agua superficial.
- S Impacto sobre la vida vegetal y animal del entorno.
- S Modificación de la calidad del agua de los acuíferos, sobre todo los más superficiales.
- S Limitación del uso del agua procedente de la mina en labores como pesca, riego, actividades recreativas, etc.
- S Dificultades en la revegetación y estabilidad de escombreras.
- S Riesgos a largo plazo.

Para el tratamiento adecuado de las aguas ácidas se deben realizar una serie de ensayos geoquímicos estáticos y dinámicos a partir de un conjunto de toma de muestras, con el fin de determinar los siguientes análisis:

- S Caracterización de los materiales para la generación de ácidos.
- S Caracterización de la movilidad de los metales.
- S Estimación del potencial de oxidación.
- S Estimación de la sensibilidad y capacidad de asimilación del medio ambiente.

Los tres métodos más utilizados para el tratamiento de escombreras frente a los fenómenos de generación de aguas ácidas son los siguientes:

1. Aislamiento

El objetivo de este método es aislar los estériles reactivos y depositarlos de forma separada o junto con estériles no reactivos. Los ensayos geoquímicos posibilitan la clasificación e identificación de los diferentes tipos de estériles para seleccionar el depósito más adecuado. En la Fig. 4.24 se muestra como los estériles sulfurados se pueden aislar dentro de una escombrera.

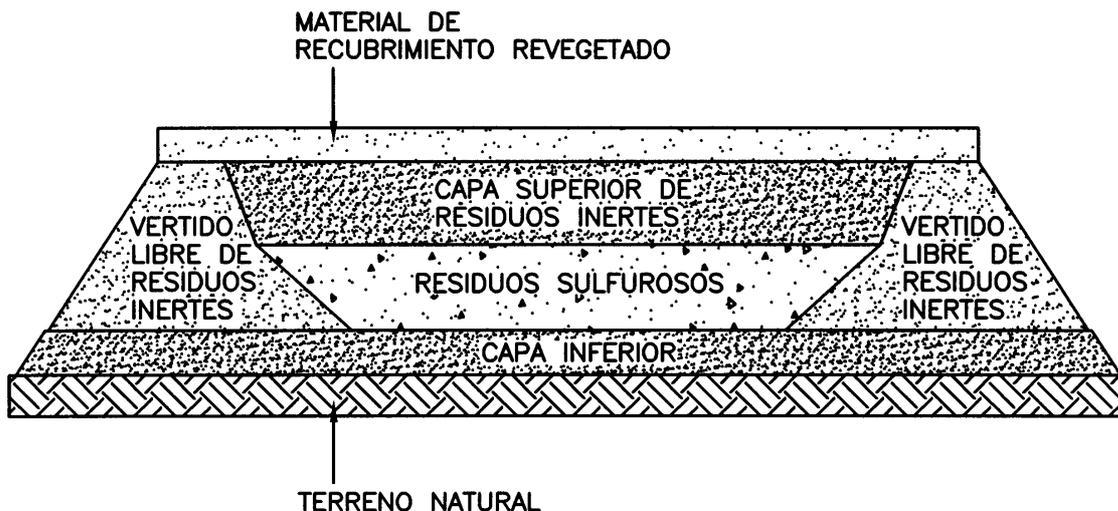


Figura 4.24. Esquema del método de aislamiento (Environment Australia, 1997).

El vertido selectivo de los estériles requiere una integración del tratamiento de los sulfuros en el diseño de la explotación, con la oportuna preparación del personal y la utilización de maquinaria adecuada.

En el plan de vertido de la escombrera se pueden establecer una serie de rellenos sucesivos, planificando el momento más adecuado de deposición de los sulfuros para que se minimice la cantidad de aguas ácidas generadas. La posibilidad de aplicar cemento en el relleno presenta la ventaja adicional de la introducción de un material alcalino. En algunos casos, es preferible proceder a la segregación de los estériles más reactivos en instalaciones separadas para facilitar su tratamiento y control.

2. Mezcla de estériles

Cuando se dispone de estériles que reúnen materiales generadores de ácido y materiales que lo consumen, la mezcla de ambos puede ser una opción muy adecuada, junto con otros métodos complementarios, para disminuir la generación de ácido al equilibrar su potencial de oxidación con el de alcalinidad. Los métodos operativos de la explotación determinarán la aplicación de estas mezclas de materiales.

Para alcanzar estos objetivos es recomendable situar el material susceptible de generar ácido de forma selectiva bajo material inerte. Para una estabilidad a medio y largo plazo, todos los materiales situados a menos de 10 m de profundidad deben ser inertes, Fig. 4.25.

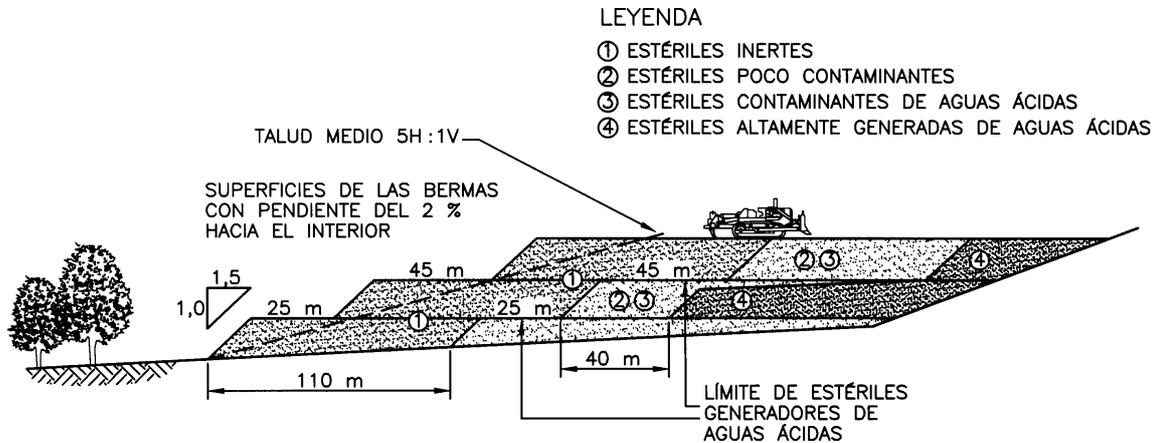


Figura 4.25. Perfil típico de una escombrera con vertido selectivo de estériles (Environment Australia, 1997).

En este sentido, también se pueden adicionar otras sustancias alcalinas como en el caso de la industria de carbón, donde se añade cenizas volantes como material alcalino que es incorporada a la pirita y a los estériles para reducir su carácter ácido. En minas metálicas, se puede añadir limo procedente de plantas de tratamiento que, por poseer una cierta alcalinidad, puede ser mezclado con los minerales productores de ácido durante su vertido.

La construcción de drenes superficiales para desviar la escorrentía y minimizar la recogida de agua es un método muy efectivo para reducir el volumen de agua superficial de la zona que puede entrar en contacto con diversos materiales y producir su contaminación, reduciendo así el posible peligro al medio ambiente.

3. Acción bacteriana

Existen algunas bacterias que favorecen la formación de ácido a partir de sustancias piríticas. Para evitar este fenómeno, se han desarrollado bactericidas que inhiben el crecimiento de estos microorganismos. Su principal efecto es la eliminación del proceso de transformación producido por la bacteria del ion ferroso en férrico bajo condiciones ácidas.

Como esto es sólo una solución a corto plazo y parcialmente efectiva, los bactericidas necesitan formar parte de un sistema integrado de tratamiento de estériles sulfurosos. Lo más habitual es su aplicación temporal en depósitos de estériles para retardar las condiciones ácidas o reducir el coste de algún tratamiento secundario mientras se ejecuta otra solución más definitiva.

En la Tabla 4.2 aparecen descritos todos los métodos de posible aplicación a escombreras, acompañados por sus esquemas correspondientes, Fig 4.26:

TABLA 4.2. Alternativas para el tratamiento de aguas ácidas en escombreras.

ENFOQUE	MÉTODO	CARACTERÍSTICAS
Preventivo	Aislamiento	Los residuos sulfurosos se envuelven en materiales no reactivos para limitar el flujo de aire y agua, reduciendo la generación de ácido. Este material no reactivo se utiliza como cimient y cubrición, formando una celda cuya superficie será recubierta de material compactado (arcilla). Esta estructura se puede realizar por fases o en la clausura de la mina.
	Depósito en corta	Este método es aplicable cuando existe una corta clausurada de suficiente tamaño y una planificación adecuada. Dependiendo de la permeabilidad, se puede necesitar el revestimiento de los taludes y fondo de la corta además de un revestimiento superficial.
	Mezcla	Implica la mezcla y vertido conjunto de estériles ácidos y no ácidos. Históricamente utilizado en la minería del carbón, consiste en la construcción de unas pequeñas celdas rápidamente rellenas y cubiertas para reducir la generación de ácido y la entrada de agua. Las celdas se construyen con materiales no ácidos de baja permeabilidad. Este método se fundamenta en la neutralización de la mezcla más que en su aislamiento.
	Micro aislamiento	Es un proceso de revestimiento de estériles para prevenir la oxidación de la pirita, mediante la utilización de una solución de fosfatos con peróxido de hidrógeno. La superficie de la pirita se oxida con el peróxido para formar óxido de hierro que reacciona con los fosfatos precipitando. Éstos forman una superficie de revestimiento sobre los fragmentos de estéril.
	Recogida y tratamiento de aguas	Se basa en la recogida del ácido generado y su tratamiento aguas abajo. Los sistemas de recogida incluyen balsas, drenes, zanjas o sondeos, mientras que los posibles sistemas de tratamiento serán químicos con control de la dilución, sistemas de evaporación, procesos de reutilización y tratamiento con filtros. Cada sistema debe ser considerado en el contexto de las características de su emplazamiento.
Correctivo	Recubrimiento	Esta opción implica la construcción de un recubrimiento de baja permeabilidad sobre una escombrera existente, utilizando material no ácido para reducir la infiltración de agua superficial y la entrada de aire. El diseño del recubrimiento debe incluir los aspectos hidrológicos y una modelización de las filtraciones para optimizar su espesor.
	Recogida y tratamiento de aguas	Aplicación correctiva del método anteriormente descrito.
	Transporte	El transporte de los estériles es una opción pero no se suele considerar debido a su alto coste. Se basa en el transporte de los estériles ácidos de escombreras existentes a zonas donde se pueda proceder a su aislamiento (cortas, huecos).

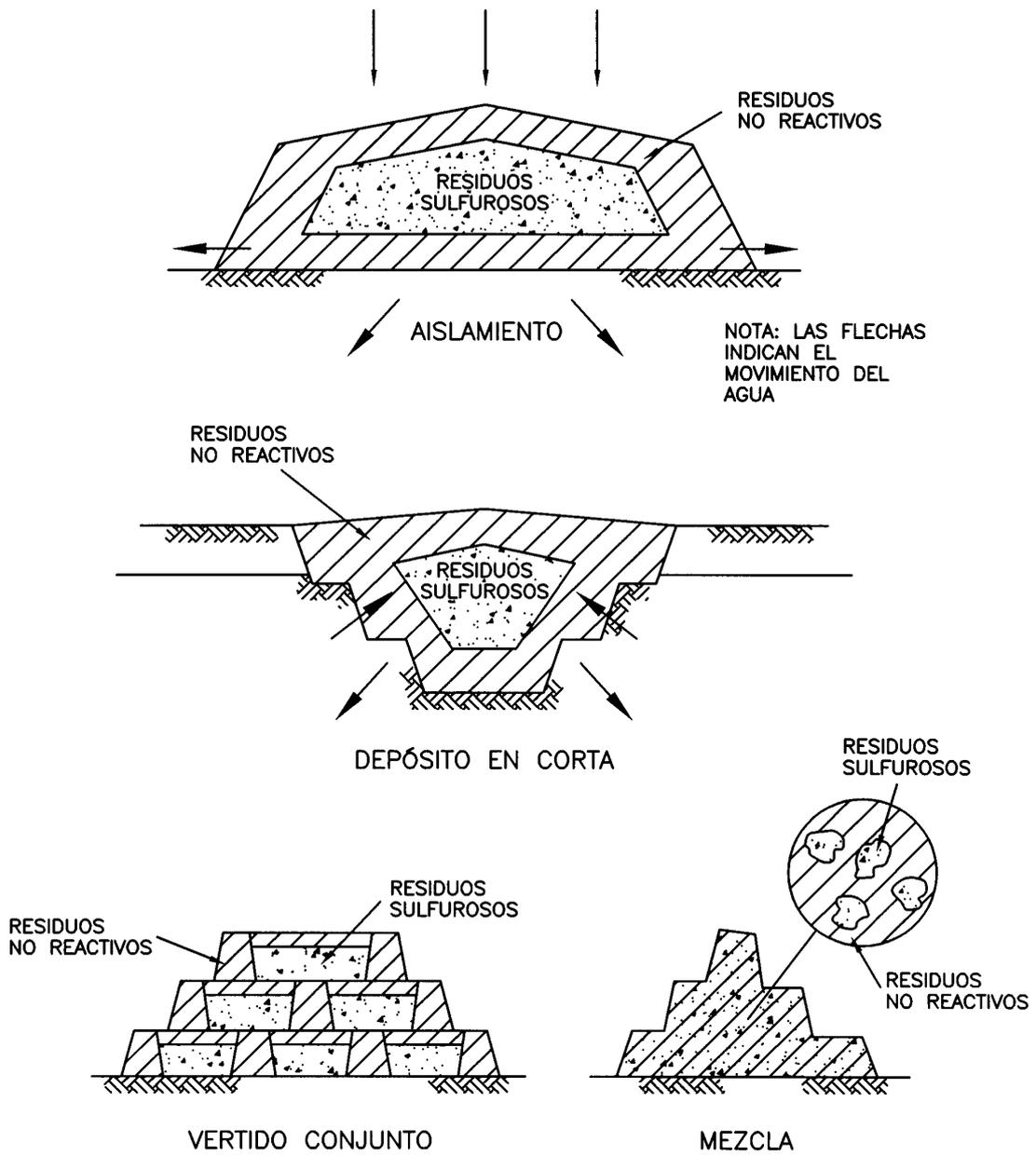


Figura 4.26. Métodos para el control de escombreras (Marszalek, 1996).

Construcción de escombreras

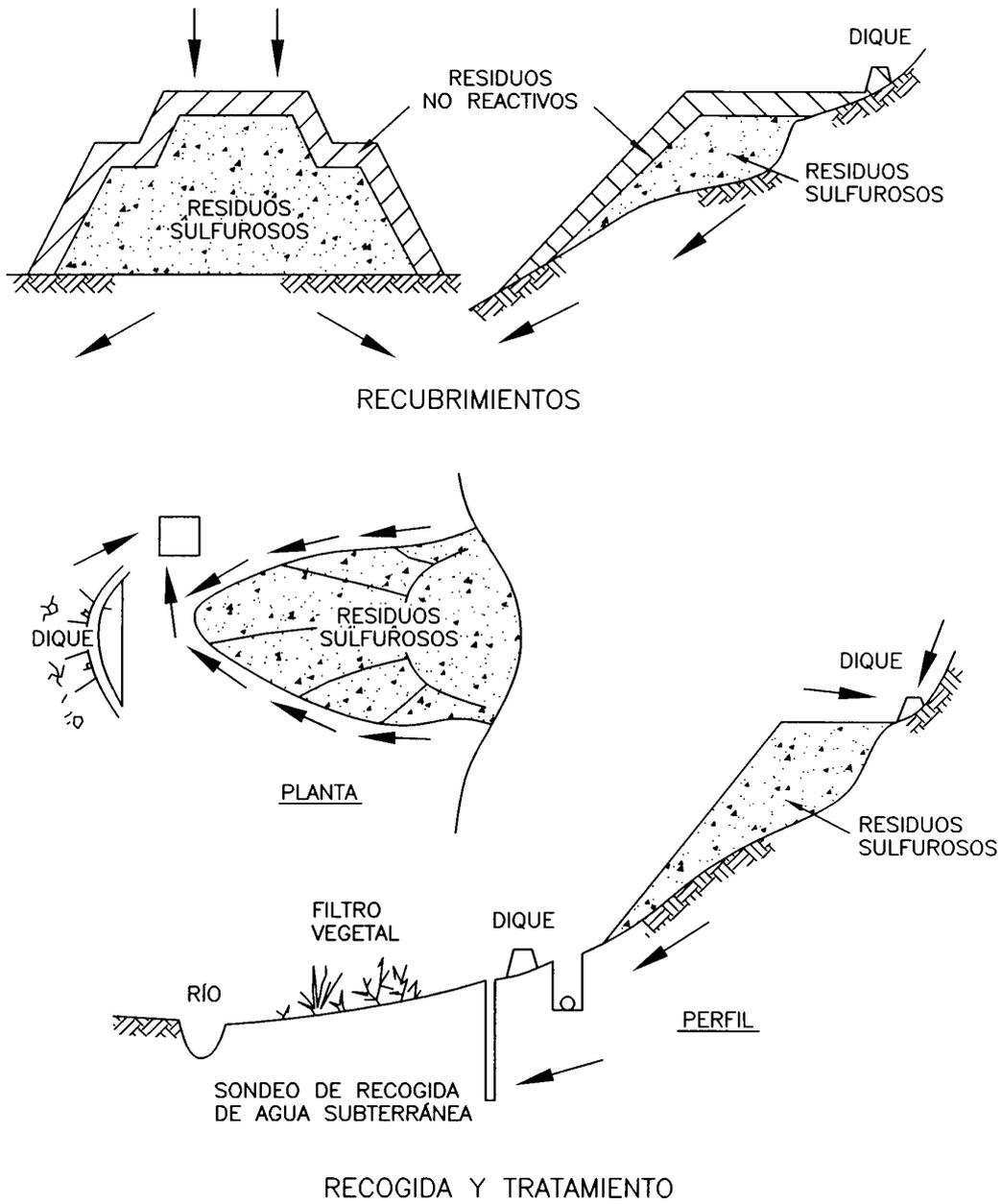
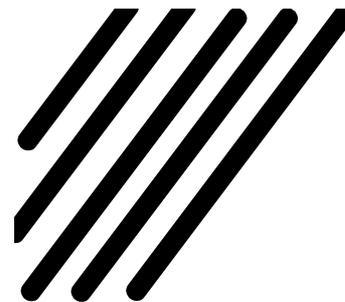


Figura 4.26. Continuación.

4.1. INTRODUCCIÓN	1-1
4.2. PREPARACIÓN DEL CIMIENTO Y SISTEMAS DE DRENAJE	1-1
4.2.1. Preparación del cimiento	4-1
4.2.2. Drenaje	4-2
4.3. CONTROL DE LA CALIDAD DE LOS MATERIALES	4-7
4.3.1. Degradación de la calidad de los materiales	4-9
4.3.2. Comprobación de las propiedades de los materiales	4-10
4.4. OPERACIONES DE VERTIDO	4-12
4.4.1. Procedimientos de vertido	4-12
4.4.2. Áreas de vertido alternativas	4-17
4.4.3. Ritmos de descarga	4-17
4.4.4. Control de la nieve	4-18
4.5. MÉTODOS Y SISTEMAS CONSTRUCTIVOS	4-19
4.5.1. Construcción de escombreras con apiladores	4-29
4.6. ESCOMBRERAS DE CONSTRUCCIÓN SELECTIVA PARA PREVENIR LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS	4-31
4.6.1. Aspectos generales	4-31
4.6.2. Medidas de control de aguas ácidas en escombreras	4-32

capítulo 5



ESCOMBRERAS DE ESTÉRILES CARBONOSOS

5.1. INTRODUCCIÓN

La combustión de escombreras de estériles de carbón es un fenómeno que se produce con bastante frecuencia, especialmente en escombreras antiguas que han sido construidas basculando directamente el material desde el borde del talud a gran altura, y en las cuales el material queda suelto sin compactar. Estos incendios pueden mantenerse activos durante muchos años, e incluso décadas, en el interior de las escombreras.

Existe poca información sobre el número y extensión actual de las escombreras en combustión, aunque cada año se reseña la ocurrencia de varios incidentes de este tipo en cada una de las principales zonas mineras, tanto de España como de otros países productores. Por ejemplo, se estima que en 1967, de las 2 000 escombreras que en aquellas fechas pertenecían a la National Coal Board en el Reino Unido, el 15 % estaban clasificadas como potencialmente combustibles, y más de la mitad de ellas ya habían ardido o estaban en combustión.

En Estados Unidos, en 1989, el Inventario de Terrenos de Mina Abandonados registraba 225 localizaciones de escombreras en combustión. El coste estimado para controlar esos fuegos, junto con otros 99 casos de minas subterráneas, ascendía a 780 millones de dólares. La superficie total afectada era de 2.800 hectáreas.

La efectividad de los métodos de control aplicados se considera que está en torno al 70 %, razón por la cual están en ejecución diferentes proyectos de investigación encaminados a mejorar los procedimientos actuales y ensayar nuevos métodos de tratamiento.

Como dato anecdótico apuntar que una de las escombreras en ignición más antiguas de las que se tiene noticias se encontraba en Pittsburg, donde comenzó a arder en el año 1765 y no se apagó hasta pasado 1846.

En España también se encuentran algunas escombreras en combustión, siendo digna de mención, por los problemas sociales que está planteando, la existente en Villanueva del Río y Minas, en la provincia de Sevilla.

Escombreras de estériles carbonosos

Se trata de un depósito de estériles abandonado, construido hace más de veinte años, y que por diversas causas entró en ignición hace unos tres años.

En las últimas décadas, en algunos países se han desarrollado normativas que obligan a que los estériles sean compactados a medida que se depositan en las escombreras, además de aplicar otras medidas preventivas. De esta forma el riesgo de combustión se reduce notablemente, como se ha puesto de manifiesto en escombreras recientemente construidas siguiendo esos criterios.

La combustión puede desencadenarse accidentalmente por propagación de otro incendio cercano, o puede producirse por una combustión espontánea de los materiales de la escombrera, sin intervención directa de ningún factor externo, por un autocalentamiento de dichos materiales que desemboca en una combustión.

Cuando la cantidad de oxígeno es limitada, puede producirse una combustión lenta sin llama. Este tipo de combustión puede continuar en el interior de la escombrera durante un largo período de tiempo, sin que se advierta en superficie ninguna evidencia.

La combustión de los materiales de escombrera, que evidentemente no siempre comienza en la superficie, está asociada a una serie de riesgos sobre la seguridad y la salud pública. Los principales peligros que acarrea la combustión de escombreras de estériles de carbón están relacionados fundamentalmente con:

- S La liberación de gases tóxicos
- S El peligro de hundimientos, y
- S Daños a las instalaciones.



Foto 5.1. Escombrera de estériles carbonosos en ignición.

Por otro lado, son causa de un gran impacto ambiental, pues se produce la contaminación del aire y, en ocasiones, de las aguas superficiales debido al arrastre de partículas sólidas y también por la acidificación de las mismas. A esto hay que añadir los propios problemas de revegetación por las características de estos materiales, que les configuran como un sustrato poco apto para la implantación y desarrollo de las especies vegetales, y por la inhibición del crecimiento de las plantas a consecuencia de los gases.

5.2. ORIGEN DE LA COMBUSTIÓN DE ESTÉRILES DE CARBÓN Y RIESGOS QUE IMPLICA

Actualmente existen escombreras que se han quemado dando como resultado final un material de color que va del amarillo al violeta, de consistencia más compacta y de mayor tamaño, producido por la sinterización de las partículas finas. También existen otras que se están quemando y otras de igual antigüedad que permanecen inalterables.

En este apartado se hace una revisión de los principales factores implicados en los procesos de combustión, así como de los riesgos más significativos que plantean los depósitos de estériles carbonosos.

5.2.1. Factores implicados

Los factores más importantes que determinan que exista o no riesgo de combustión de los estériles carbonosos son los siguientes:

- S Composición de los estériles
- S Curva granulométrica
- S Compactación
- S Método de construcción de la escombrera y sistema de vertido
- S Tamaño de los materiales
- S Existencia en la escombrera de zonas expuestas al viento
- S Existencia de un recubrimiento de materiales incombustibles.

Los estériles pueden clasificarse según su combustibilidad en tres categorías principales:

- S Susceptibles de combustión espontánea
- S Combustibles, pero no susceptibles de combustión espontánea
- S No combustibles.

5.2.2. Ignición espontánea

Los materiales de escombrera pueden comenzar a arder espontáneamente debido a un efecto de autocalentamiento originado por la oxidación química lenta de los materiales carbonosos que contenga.

Escombreras de estériles carbonosos

En los apartados siguientes se describen los factores que afectan o determinan la posibilidad de que se produzca la combustión espontánea.

1. Temperatura

La oxidación de los materiales carbonosos constituye una reacción exotérmica, y si la velocidad a la cual se produce el calentamiento excede la velocidad a la que se disipa el calor, puede producirse un efecto de acumulación que incremente progresivamente la temperatura de la escombrera que llegue a desencadenar un proceso de combustión sin llama. Este efecto se produce si existe suficiente oxígeno en el interior de la masa de estériles.

2. Pirita

La pirita es un componente relativamente habitual en las escombreras de estériles de carbón. Su oxidación es también una reacción fuertemente exotérmica, por lo que la presencia de pirita junto con materiales carbonosos incrementa el riesgo de que se produzca la combustión espontánea.

3. Calidad del carbón

Los carbones de baja calidad son más reactivos y más susceptibles al autocalentamiento que los de buena calidad, ya que aquéllos tienen menos carbono y mayor contenido en oxígeno que éstos.

4. Contenido en carbón

Existen ciertas discrepancias sobre el papel que juega el contenido en carbón de los estériles en la combustión espontánea. Ciertamente, si el contenido en carbón es alto, es favorable para el calentamiento y entonces tiene lugar la combustión espontánea. Sin embargo, no puede asegurarse que cuando el contenido en carbón sea pequeño no haya riesgo.

También debe tenerse en cuenta la influencia no sólo del porcentaje de carbón, sino también de la tendencia de algunos carbones a arder con mayor facilidad que otros.

5. Humedad

La presencia de humedad libre es esencial para que se produzca la oxidación de la pirita, y su existencia puede así acelerar el proceso de autocalentamiento.

La existencia de un alto contenido en humedad en los carbones de baja calidad es indicativo de una tendencia marcada al autocalentamiento y, como consecuencia, a la combustión espontánea.

6. Volumen de huecos y tamaño de partículas

La existencia de huecos de determinado tamaño en una escombrera facilita la entrada de aire hacia el interior de ésta, aportando un suplemento constante de oxígeno que estimula las reacciones exotérmicas.

Cuando las escombreras están formadas por materiales de granulometría gruesa el movimiento del aire a través de los huecos puede ser suficiente para disipar el calor en un volumen relativamente grande de material vertido.

En las escombreras en las que predominan los materiales de granulometría fina, en las cuales el movimiento del aire está dificultado por la inexistencia de huecos o por ser éstos de tamaño excesivamente pequeño, el calor generado tiende a ser retenido. Sin embargo, en ellas el proceso de autocalentamiento puede cesar cuando se consume el oxígeno.

En escombreras formadas por materiales de tamaño intermedio, las condiciones para el autocalentamiento y la combustión espontánea son ideales. Se pueden formar zonas de alta temperatura que eventualmente comiencen a arder.

La velocidad de oxidación y la acumulación de calor se incrementan cuando existe una alta proporción de partículas de grano fino, porque la relación superficie/volumen es muy alta.

Resulta evidente que para que se produzca la combustión espontánea es preciso un suministro de aire para propagar el proceso de oxidación y sostener el calentamiento. Por tanto, una compactación enérgica reduciría el número de huecos, de forma que se imposibilite la presencia de aire para provocar el inicio de las reacciones. Es un hecho conocido que las escombreras más modernas construidas con técnicas utilizadas en la construcción de carreteras, donde se incluye una buena compactación, no han presentado hasta ahora signos de autocombustión, incluso con contenidos en carbón de hasta un 20%; como en la escombrera experimental de Elsecar-South Yorkshire en Inglaterra, construida conforme a la *Specification for Road and Bridge Works*.

Si a la compactación se añade el extendido de tierra vegetal en los taludes laterales y plataformas, la formación de vida orgánica en los mismos reducirá aun más las posibilidades de entrada de oxígeno.

7. Volumen de la escombrera

Un alto valor de la relación superficie/volumen de la escombrera favorecerá su inalterabilidad, dada la mayor facilidad de que dispone el calor para disiparse hacia el exterior.

5.2.3. Ignición accidental

La ignición accidental generalmente se produce debido a la aplicación sostenida de calor en la superficie de la escombrera. Este calentamiento puede deberse a múltiples causas, entre ellas:

- S Una hoguera (como sucedió hace unos años recientemente en la escombrera de Villanueva del Río y Minas en Sevilla)
- S La quema de la cubierta herbácea que pueda haberse desarrollado en la escombrera
- S El vertido de cenizas calientes
- S Cables eléctricos subterráneos.

A menudo se desencadena un proceso de combustión subsuperficial que continúa una vez que se ha extinguido el fuego inicial.

5.2.4. Riesgos intrínsecos de las escombreras en combustión

1. Emisión de gases tóxicos

Los gases producidos en la combustión de los estériles de carbón son, entre otros:

- S Monóxido de carbono
- S Dióxido de azufre
- S Dióxido de carbono
- S Sulfuro de hidrógeno.

Estos gases tienden a acumularse en las zonas bajas donde la ventilación es peor. Las bolsas de gas así formadas constituyen un riesgo grande para los operadores que trabajen en las inmediaciones de la escombrera que los haya generado, particularmente para aquellos conductores que trabajan en cabinas pobremente ventiladas. La inhalación de estos gases puede afectar a las personas por toxicidad directa o por asfixia, Tabla 5.1.

Los gases pueden desplazarse a considerable distancia a través del subsuelo, y acumularse en la cercanía de edificios, con el consiguiente peligro para sus habitantes.

TABLA 5.1. Efectos fisiológicos de los gases producidos en la combustión.

MONÓXIDO DE CARBONO

Es el más peligroso de los gases nocivos ya que no puede ser detectado por el olor, gusto o irritación, puede alcanzar concentraciones potencialmente letales. La exposición al gas durante poco tiempo causa dolor de cabeza, debilidad y náuseas. Un incremento de la exposición provoca trastornos respiratorios, palpitaciones y vómitos, seguidos de pérdida de la consciencia y, en los casos más graves, muerte.

DIÓXIDO DE CARBONO

El dióxido de carbono es un gas asfixiante. En cortas exposiciones se produce hiperventilación pulmonar. En exposiciones prolongadas, respiración pesada y dolores de cabeza, con una eventual pérdida de consciencia.

SULFURO DE HIDRÓGENO

Este gas se detecta rápidamente por el olfato y el gusto. Exposiciones cortas provocan irritaciones en ojos y garganta, y algunas veces dolores de cabeza. Las exposiciones prolongadas llevan a la inconsciencia. La capacidad para detectar este gas por su olor y sabor tiende a desaparecer durante las exposiciones prolongadas.

DIÓXIDO DE AZUFRE

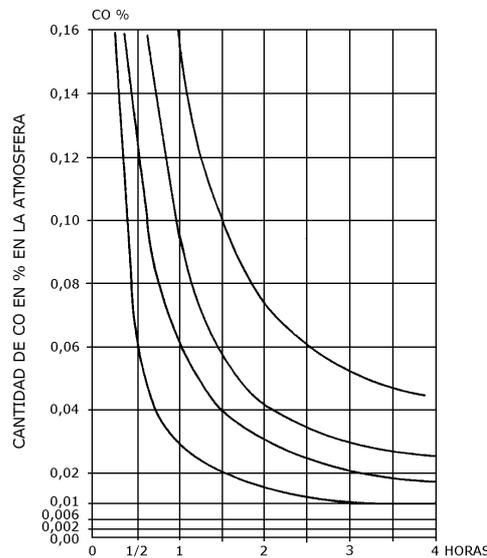
Este gas se detecta por el gusto cuando la concentración es pequeña, y por el olor cuando está presente en cantidades mayores. Las exposiciones cortas ocasionan irritación de la nariz y la garganta, y algunas veces de los ojos. Una exposición prolongada puede causar la muerte.

Parece constatado que en la fase inicial, como consecuencia de la reacción de la pirita, el agua y el oxígeno (aire húmedo), se libera sulfuro de hidrógeno (que produce el olor característico a huevos podridos, que puede detectarse en cualquier escombrera en ignición), así como algo de calor. Al aumentar la temperatura, se quema, produciendo, si existe suficiente oxígeno, gases de dióxido de azufre, el cual puede formarse directamente de la pirita a altas temperaturas.

Al aumentar la temperatura, el carbón y las materias carbonosas comienzan a arder, con lo que se produce un rápido aumento de la temperatura, que en algunos casos puede alcanzar los 1 000 - 1 200 °C.

Debido a la combustión del carbón, se reduce la cantidad de oxígeno disponible, por lo que, en estas condiciones, se produce monóxido de carbono, Fig. 5.1, que reacciona con otros materiales, especialmente con los compuestos de azufre, dando lugar a la presencia de azufre libre, hecho que se puede observar en diferentes escombreras en las grietas superficiales por las que se producen emanaciones.

EFFECTOS DEL CO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE PERMANENCIA



EFFECTOS DEL CO SOBRE EL ORGANISMO HUMANO

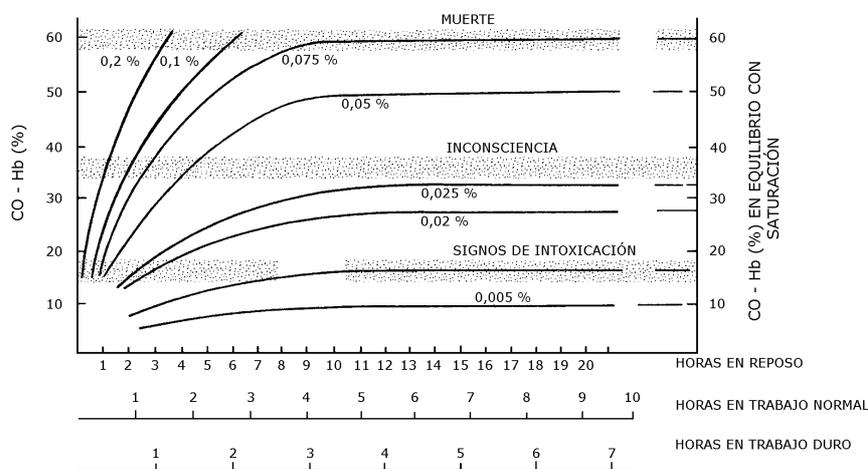


Figura 5.1. Efectos del monóxido de carbono sobre las personas.

Escombreras de estériles carbonosos

2. Hundimientos superficiales

La combustión puede ocasionar fenómenos de subsidencia o hundimiento superficial. Los materiales se consumen formándose cavidades ocultas, las cuales pueden colapsar repentinamente. El acceso de personal y maquinaria a estas zonas es entonces arriesgado.

El fuego puede también extenderse por debajo de los edificios construidos sobre rellenos, deteriorando su estabilidad estructural y provocando eventualmente su hundimiento. Este tipo de incidentes han ocurrido en algunas zonas en las que el avance de la combustión no ha podido ser controlado, y los edificios han tenido que ser abandonados y demolidos.

La combustión no siempre produce esta pérdida de estabilidad. Algunas veces el fuego aumenta la capacidad portante de los terrenos al fundirse los materiales que los conforman por efecto de las altas temperaturas, Tabla 5.2.

TABLA 5.2. Secuencia de combustión espontánea en escombreras de carbón.

TEMPERATURA (°C)	EFEECTO
20	Más del 90% del contenido en oxígeno es absorbido. Los gases escapan, contienen (v/v base seca): < 0,05 % O ₂ 0 - 10 % CH ₄ 2 - 10 % CO ₂ 2 - 10 % N ₂
100	La combustión se incrementa, se libera un contenido traza de CO.
200	Dependiendo del estado de oxidación y la velocidad del flujo de gas, son liberados diversas cantidades de CH ₄ , CO, CO ₂ , C ₂ H ₆ , C ₄ H ₈ , H ₂ S y SO ₂ .
300	Se produce la carbonización y el carbón se transforma en un fluido.
450	Toda el agua intersticial es eliminada.
500	Se producen gases de (NH ₄)SO ₄ y NH ₄ Cl. Se libera NH ₃ , alquitrán, SO ₂ , CO, SO ₂ , H ₂ S y N ₂ .
600	Los materiales micáceos comienzan a descomponerse.
800	El contenido en arcilla se elimina y se forman estériles rojos.

Fuente: Goodman y Chadwick, (1.978).

3. Riesgo de combustión de las estructuras y los servicios subterráneos

Las estructuras subterráneas, como cables o tuberías, pueden verse afectadas por el calentamiento.

Las galerías de servicio y las zanjas de drenaje pueden, algunas veces, actuar como chimeneas, haciendo tiro a través de las cuales se extiende el incendio o los productos de la combustión.

4. Riesgo de explosión

Cuando se trata de controlar los incendios subsuperficiales, el uso de agua puede provocar explosiones.

Las inyecciones de agua a presión pueden conducir a la formación de vapor de agua. El carbón caliente en contacto con este vapor de agua puede formar el llamado *gas de agua*, que es una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno. La mezcla del *gas de agua* con el aire, cuando entra en combustión, puede explotar con gran violencia.

La mezcla de polvo de carbón y aire también es explosiva. De forma que en las escombreras que contienen una cantidad significativa de carbón, existe un riesgo de explosión si se produce una cantidad excesiva de polvo.

5. Polvo

Los niveles de polvo dependen en gran medida de las condiciones meteorológicas.

El tiempo lluvioso ayuda a reducir la propagación del polvo, mientras que el tiempo seco promueve su generación y propagación.

La emisión y propagación del polvo desde una escombrera en combustión puede causar molestias a la población, especialmente en tiempo seco, aunque no constituye un riesgo para la salud, siempre que la cantidad de polvo emitida no sea excesiva.

6. Contaminación de las aguas

Un problema ambiental presente en muchos depósitos de estériles carbonosos es el de la generación de Aguas Ácidas (AA).

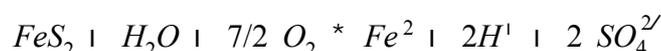
Las aguas ácidas, de bajo pH, contienen por lo general una gran cantidad de sólidos disueltos y un alto contenido de metales pesados (Cd, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn), del orden de varios cientos de miligramos por litro, y sulfatos. Son nocivas para la actividad biológica, tanto acuática como terrestre, pueden provocar la contaminación de cursos de agua de utilidad y causar graves daños a estructuras construidas por el hombre.

En lo referente al proceso de formación de las aguas ácidas, la generación de las mismas tiene lugar cuando se produce la oxidación química de sulfuros, acelerada en muchos casos por la acción bacteriana.

Los principales elementos que intervienen son pues: los sulfuros reactivos, el oxígeno y el agua (vapor o líquida), y como elemento catalizador las bacterias.

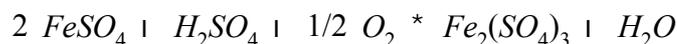
Las reacciones que tienen lugar, para el caso de la pirita, son las siguientes:

Oxidación del sulfuro:



Escombreras de estériles carbonosos

Oxidación del sulfato ferroso a férrico:



Formación de hidróxido férrico y ácido sulfúrico:



La velocidad de reacción es una variable muy importante, pues si el proceso ocurre muy lentamente el efecto sobre el medio puede ser despreciable. Sin embargo, la generación rápida de AA es el principal problema.

Esa velocidad de reacción depende de numerosos factores. Ciertas especies mineralógicas son más reactivas que otras, por ejemplo la marcasita, que tiene la misma fórmula que la pirita, es muy inestable y puede generar rápidamente AA. Los sulfuros de otros metales (plomo, cinc o cobre) son generalmente menos reactivos que los de hierro, en parte, debido a la mayor estabilidad de su estructura cristalina y, también, porque forman minerales menos solubles que encapsulan a los propios sulfuros impidiendo que progrese su oxidación.

La cantidad y el tamaño de los granos del mineral influyen en la velocidad de reacción. Las texturas finas con variedades mal cristalizadas se oxidan más rápidamente que los granos cristalinos gruesos. Por ejemplo, una forma de pirita desarrollada en condiciones de baja temperatura puede producir mucho más rápidamente acidez que una gran masa de sulfuros formada a alta temperatura, debido a la menor relación superficie/volumen.

Como el agua y el oxígeno son dos componentes esenciales en la reacción, la exclusión de cualquiera de ellos paralizará el proceso de formación de AA. Sin embargo, se precisan grandes cantidades de oxígeno en relación con el volumen de agua necesario. Por ejemplo, sumergiendo los sulfuros en agua se suele parar la reacción, debido a la baja difusión del oxígeno en el agua. No obstante, la presencia de aire conteniendo una pequeña cantidad de humedad induce la oxidación. La temperatura, también, ejerce un efecto de control importante, pues en ambientes fríos la velocidad de reacción disminuye.

La producción de nuevos compuestos por la reacción de los sulfuros puede cambiar la velocidad del proceso de generación de AA. En el caso del sulfuro de hierro meteorizado los productos pueden reaccionar posteriormente con la pirita, acelerando el mecanismo de oxidación. Por otro lado, los productos de la reacción pueden recubrir los sulfuros previniendo su alteración. Las propiedades químicas de las aguas determinarán si los nuevos compuestos formados precipitarán o se mantendrán en disolución.

Como ya se ha indicado, ciertas bacterias actúan como catalizadoras de las reacciones. Su importancia depende intensamente de las condiciones de pH, temperatura, existencia de concentraciones críticas de elementos, como el molibdeno que puede ser tóxico para las bacterias, etc.

En principio, debe considerarse que las bacterias implicadas en el proceso están presentes en todos los terrenos, y que su abundancia o actividad depende de la idoneidad o toxicidad del medio.

Por otro lado, hay que tener presente que muchas rocas contienen minerales que consumen de forma natural los ácidos producidos en la oxidación de los sulfuros. Este proceso de neutralización natural es intenso

cuando existe carbonato cálcico, principal constituyente de las calizas, pero también son neutralizantes los carbonatos de hierro y magnesio, los hidróxidos de hierro y aluminio, que pueden ayudar a elevar el pH hasta niveles aceptables.

La cantidad relativa de esas rocas, respecto a la cantidad de sulfuros, determinan la acidificación de las aguas. Si existe bastante caliza y dolomía los productos de reacción como el yeso o las sales de hierro podrán revestir las partículas de sulfuros y disminuir la velocidad de reacción. Si, por el contrario, la cantidad de sulfuros es grande, una vez consumidos los materiales neutralizantes, los drenajes volverán a ser ácidos.

La cantidad y calidad del drenaje ácido que, por ejemplo, se produce en una escombrera, dependen de las características físicas, químicas y biológicas de los materiales a través de los cuales circulan las aguas.

Algunas propiedades de los estériles de las escombreras, tales como permeabilidad, cantidad de agua intersticial, presión de poro, y mecanismos de circulación, son factores que controlan la velocidad de migración y reacción de las fuentes contaminantes, y el grado de dilución que se produce desde la fuente originaria hasta que los drenajes alcanzan el medio receptor.

La actividad biológica, distinta a la de las bacterias oxidantes, influye también en la calidad de las aguas a lo largo de las rutas de migración. Determinadas especies biológicas pueden atenuar la concentración de metales por absorción o quizás por precipitación, especialmente si las aguas ácidas circulan a través de zonas encharcadas o anaeróbicas.

El medio natural que rodea a una estructura contaminante, como puede ser una escombrera, tiene una cierta capacidad natural de corrección de las aguas ácidas, bien sea por neutralización, por dilución o por mecanismos biológicos. Para cualquier depósito de estériles existe un nivel de generación de efluentes que podrá ser soportado por el medio natural, pero generalmente es muy limitado.

Es interesante destacar que el impacto ambiental producido por las aguas ácidas puede cambiar con el tiempo, sobre todo si la capacidad de neutralización del medio se agota. Por eso, el objetivo de las medidas preventivas y de abandono se centran en buscar que los efluentes contaminantes que se generen estén por debajo de los niveles que pueda asimilar el medio natural, sin que se produzcan impactos significativos.

Parte de esas medidas son comunes a las aplicadas para la prevención de fuegos en este tipo de depósitos de estériles carbonosos.

Los procedimientos existentes en la actualidad para la determinación del potencial productor de acidez en rocas asociadas al carbón son variados. Existen algunos basados en dos parámetros composicionales de la roca: el porcentaje en peso de azufre y el porcentaje en peso de minerales solubles en HCl caliente.

En estas técnicas hacen algunas suposiciones, así se asume que todo el azufre está contenido en minerales de sulfuro de hierro, pirita y/o marcasita, y que todos los minerales compuestos por sulfuro de hierro reaccionarán para formar ácido. También acepta que todos los minerales carbonatados se disolverán para formar soluciones alcalinas que neutralizarán el ácido producido.

Basándose en las hipótesis anteriores y aceptando la reacción estequiométrica se calcula el potencial máximo de acidez y el neutralizador. La respuesta neta de la roca a la meteorización se determina como diferencia de ambos parámetros.

Escombreras de estériles carbonosos

Sin embargo, alguna cantidad indeterminada de sulfuro de hierro y minerales carbonatados podrá estar encapsulada en la matriz de la roca y no estará disponible para la reacción. Además, no todos los minerales carbonatados se disolverán para producir soluciones alcalinas. La siderita, por ejemplo, no produce solución alcalina y, desafortunadamente, no es un mineral raro en rocas asociadas al carbón.

El mejor método es no admitir ningún mecanismo para evaluar la producción de soluciones ácidas o alcalinas. Así, el procedimiento analítico descrito por Renton, Rymer y Stiller de la Universidad de Virginia del Oeste, no hace suposición alguna relativa a composición de las rocas o a la estequiometría de la reacción de producción de acidez.

La predicción de la producción de acidez se calcula basándose en tres parámetros:

- 1) El azufre contenido en la roca.
- 2) Un ratio constante determinado por la respuesta química de la roca ante las condiciones simuladas de meteorización.
- 3) La masa de la roca.

5.3. EVALUACIÓN DEL RIESGO DE COMBUSTIÓN ESPONTÁNEA

Hay muchos factores que influyen en que una escombrera sea combustible o no. Existen diversas pruebas y ensayos de laboratorio que sirven para valorar el potencial de combustibilidad de los materiales, aunque los resultados de estas pruebas deben ser considerados con cierta reserva, especialmente en cuanto al riesgo de combustión espontánea.

Sin entrar en una exposición detallada, a continuación se comentan los parámetros que tienen una relevancia especial en la determinación de la combustibilidad.

5.3.1. Poder calorífico (PC)

Éste es uno de los parámetros más comúnmente utilizados para la determinación de la combustibilidad. Es una medida de la cantidad de calor liberado por una muestra en combustión.

Generalmente se considera que una muestra con un PC de más de 10 MJ/kg es combustible, y con 2 MJ/kg o menos, no lo es.

Las muestras con un PC de más de 7 MJ/kg, se considera que tienen riesgo de entrar en combustión *sin llama*, aunque en laboratorio este fenómeno puede ya suceder en muestras con menos de 7 MJ/kg de PC.

En la Tabla 5.3 se relacionan algunos ejemplos de los poderes caloríficos de escombreras de distintos países europeos.

Las escombreras formadas durante el siglo pasado y principios de éste tienen un PC mucho mayor que las escombreras modernas, por su alto contenido en carbón.

TABLA 5.3. Poder calorífico de estériles de carbón (Cañibano y Leininger, 1987).

PAÍS	PODER CALORÍFICO (MJ/kg)
Alemania	2,0 - 6,0
España	2,2 - 5,5
Gran Bretaña	5,0 - 8,0
Francia	1,7 - 5,0

Fuente: Cañibano y Leininger, 1987.

5.3.2. Pérdida en peso durante la combustión

Esta prueba consiste en la medida de la pérdida en peso que sufre una muestra en combustión. Las muestras que pierden un 25% o más de peso generalmente se consideran combustibles.

5.3.3. Potencial de combustión

Esta prueba ha sido desarrollada en el Reino Unido. Con ella se determina la combustibilidad de un material estéril bajo condiciones similares a las que tendría una vez depositado en la escombrera.

Se realiza calentando el material en un recipiente especial, y con un flujo controlado de aire. A lo largo de la prueba se realiza un seguimiento continuo de la temperatura, para ver como se va incrementando.

5.3.4. Cambio en las condiciones de la zona de vertido

La experiencia demuestra que aquellos materiales susceptibles de combustión espontánea por autocalentamiento entran en combustión en un plazo de semanas, más que de años.

De forma que, asegurando que no se producen cambios significativos en las condiciones ambientales, las escombreras antiguas que no hayan entrado en combustión, normalmente no corren riesgo de que lo hagan en el futuro.

5.3.5. Temperatura

Se puede realizar un seguimiento en campo de la temperatura en escombreras que están en combustión utilizando tubos de acero introducidos en el interior de ésta, siguiendo una distribución espacial determinada.

Estos tubos suelen ser de 50 mm o menos de diámetro, y se introducen en la escombrera a intervalos de varios metros, utilizando un martillo neumático de percusión.

Las lecturas de temperatura pueden realizarse siguiendo un gradiente de profundidad, mediante la utilización de termopares conectados a un termómetro digital. Donde la zona en combustión es profunda es necesario

Escombreras de estériles carbonosos

hacer taladros revestidos de cenizas volantes pulverizadas o de cemento, en los que son introducidos los tubos de acero.

En la fase inicial pueden utilizarse equipos portátiles de rayos infrarrojos para medir la temperatura de la superficie. La fotografía aérea, utilizando un equipo termográfico, también es adecuada para el seguimiento de grandes superficies, cuando la topografía no presenta puntos de observación dominantes.

En escombreras en combustión pueden llegar a registrarse temperaturas de más de 1 200 °C. La combustión comienza a más de 200 °C. Temperaturas inferiores a ésta, pero significativamente por encima de la temperatura del interior, indican riesgo de autocombustión.

A continuación se explica la metodología utilizada para la realización de las termografías infrarrojas, así como los fundamentos teóricos de los fenómenos que sirven para su obtención.

1. Termografías infrarrojas

Actualmente, las termografías constituyen una herramienta eficaz para la detección e identificación de fuentes de calor y evaluación de diferencias de temperaturas. La precisión a la que se llega es de 0,1 °C, con alcances de medida típicos de -20 °C a 1 500 °C.

La tecnología que ha hecho esto posible procede de desarrollos realizados en terrenos de la investigación militar y espacial. Estos desarrollos incluyen detectores cuánticos de respuesta rápida, sistemas ópticos con una transmisión muy alta en la región infrarroja, sistemas electromecánicos de alta precisión para la exploración de la imagen, y avances en la microelectrónica que permiten la amplificación de la señal con gran ganancia y bajo ruido, así como la realización de los circuitos de control de los equipos.

La combinación de estas tecnologías ha dado como resultado la aparición de sistemas compactos y portátiles para la obtención en tiempo real de imágenes infrarrojas, capaces de mostrar las diferentes temperaturas como variaciones de tonos de gris o de color en un monitor de vídeo. La calidad de la imagen que se obtiene con algunos equipos ha llegado a ser tan alta que es a veces difícil recordar que se están visualizando complejas distribuciones de temperatura y no luz visible.

2. Sistemas termográficos

La termografía industrial se ha desarrollado, en general, alrededor de sistemas de alta sensibilidad. En función de sus prestaciones se pueden clasificar en tres grandes familias, cada una de ellas orientada a un tipo específico de aplicación:

- S Radiómetros de imagen
- S Cámaras de imagen
- S Radiómetros de línea.

A. Radiómetros de imagen

Estos equipos generan imágenes infrarrojas en tiempo real y son instrumentos calibrados respecto a patrones de referencia, de forma que permiten medir para cualquier punto de la imagen la radiación infrarroja recibida por la cámara.

B. Cámaras de imagen

Dentro del grupo de cámaras de imagen, familiarmente conocido como visores, se incluyen equipos capaces de generar imágenes térmicas pero que no permiten realizar medidas de niveles de radiación infrarroja o temperatura de los objetos.

C. Radiómetros de línea

Los radiómetros de línea, de reciente aparición en la industria, se diferencia en dos aspectos de los radiómetros de imagen:

- El barrido óptico se produce solamente en una dirección, generalmente mediante un espejo oscilante.
- La velocidad de muestreo es inferior, por lo que sin perder sensibilidad ni resolución se emplean sensores refrigerados termoeléctricamente.

3. Interpretación de datos

La adquisición de datos termográficos y su correcta interpretación requiere el empleo de equipos muy sensibles, con capacidad de realizar medidas cuantitativas, manejados por operadores entrenados y con experiencia. La interpretación de las imágenes suministradas por el equipo termográfico se puede comparar con la observación de una pantalla de radar o la interpretación de una radiografía.

La experiencia del operador es fundamental, pues además de conocer y comprender el principio de funcionamiento y capacidad del equipo termográfico, necesita una práctica constante para la correcta interpretación de los resultados.

5.3.6. Indicadores de superficie

Los indicadores de superficie que ayudan a detectar que se está produciendo un fuego en el interior de una escombrera de estériles son habitualmente los siguientes:

- S Áreas carbonizadas y cavidades o depresiones.
- S Emisiones de humo y gases.
- S Emisiones de vapor de agua cuando llueve.
- S Superficies que no se hielan, cuando los terrenos adyacentes sí que lo hacen.
- S Zonas donde la vegetación ha muerto o presenta síntomas de decaimiento.

Aunque, al principio, con temperaturas moderadamente elevadas puede desarrollarse en estas zonas una vegetación mucho más densa y de mayor porte que en el resto.

- S Temperaturas elevadas.
- S Áreas de subsidencia localizada.

5.3.7. Modelo del proceso de autocombustión de depósitos de estériles de carbón

Aunque el estudio de los procesos de autocombustión es fundamentalmente experimental, se han desarrollado una serie de modelos simples y tratamientos matemáticos para identificar y evaluar los parámetros físicos más importantes.

1. Contenido mínimo en combustible para la autoignición de estériles de carbón

Un depósito de estériles de carbón en ignición es la evidencia adecuada de que contiene suficientes materiales combustibles para quemarse. Sin embargo, la composición de los depósitos no es uniforme, una parte pueden ser residuos de lavadero y otra procedente de labores de mina. Así, es preciso estimar qué concentración mínima de combustibles es necesaria para lograr la autoignición.

Para lograr este objetivo, el depósito de estériles se considera formado por tres componentes: (a) carbón, (b) materia inerte y (c) agua, y que no existen pérdidas de calor salvo en los gases de escape. El balance de energía se puede expresar como:

$$Q_{rel} = Q_{ex} + Q_{rem}$$

donde:

- Q_{rel} = Proporción de calor producido por la combustión
- Q_{ex} = Proporción de calor liberado con los gases de escape
- Q_{rem} = Proporción de calor acumulado en el material inerte.

Se denomina X_c , X_w como la fracción de masa inicial de carbón y agua, respectivamente, en el estéril y m_{aire} , m_c , m_w como las proporciones de masa de inyección de aire, carbón en combustión y agua evaporada, respectivamente, y ΔH_c y ΔH_v , como calores de combustión de carbón y de evaporación del agua respectivamente, se tiene así:

$$Q_{rel} = m_c \cdot \Delta H_c$$

$$Q_{ex} = (m_c + m_w + m_{air}) C_p \Delta T + m_w \cdot \Delta H_v$$

$$Q_{rem} = (1 / X_c / X_w) \left(\frac{m_c}{X_c} \right) \cdot C_p \Delta T$$

Suponiendo un incremento de temperatura uniforme ΔT y una capacidad calorífica C_p , para todos los materiales sólidos y gaseosos presentes.

$$\Delta H_c + \frac{m_w}{m_c} \Delta H_v = \left[\frac{m_{air}}{m_c} + \frac{1}{X_c} \right] C_p \Delta T$$

Operando se llega a:

$$B = \frac{\left[\frac{H_c}{H_v} + \frac{1}{C_p} \right] \Delta T_{fi}}{\frac{1}{X_c}}$$

donde:

$$\theta = \frac{m_w}{m_c} = \frac{X_w}{X_c}$$

es la proporción de masa de agua a masa de carbón en el estéril y

$$B = \frac{m_{aire}}{m_c}$$

la estequiometría del proceso de combustión del carbón (relación aire/carbón).

El efecto del agua es disminuir el calor efectivo en la combustión y el del carbón contenido en el estéril es el de alterar la estequiometría efectiva con la relación aire/combustible.

En la Fig. 5.2 se puede ver un ejemplo de aplicación a una escombrera, tomando $B = 12$ y $\Delta H_c = 7\,600$ cal/g, calor de evaporación del agua 540 cal/g y la capacidad calorífica del producto quemado 0,5 cal/g °C.

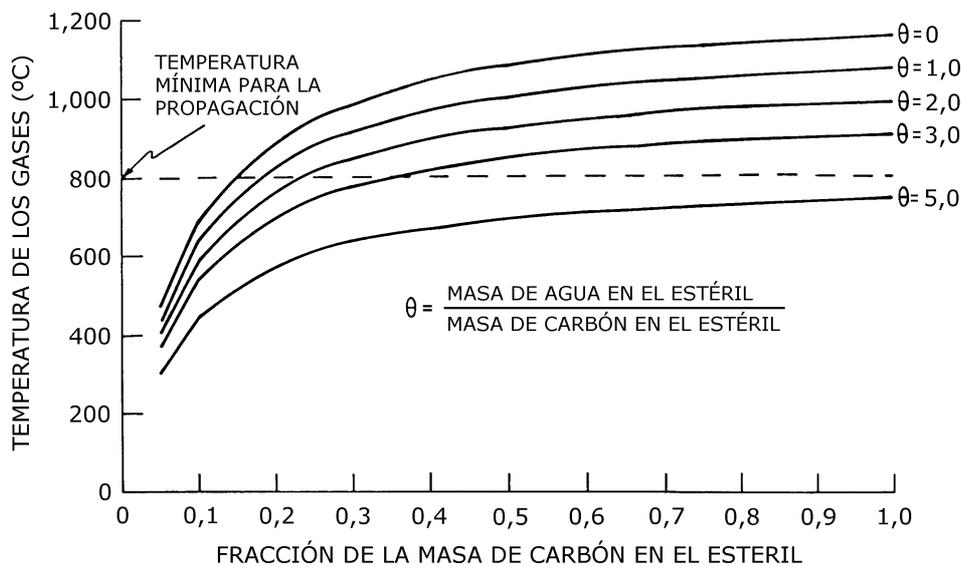


Figura 5.2. Temperatura de los gases en función del contenido en agua y carbón.

Se representa la temperatura del gas para varios contenidos de agua y carbón en el estéril (θ). La frontera para una rápida autoignición está en 800 °C.

Escombreras de estériles carbonosos

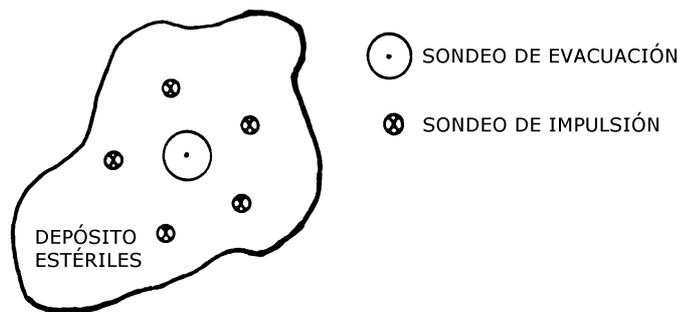
Por ejemplo, una escombrera con el 35 % de carbón, cae en la región de autoignición, proporcionando un gas a 950 °C, luego la mayoría de las escombreras poseen suficiente combustible para arder.

2. Combustión forzada de un depósito de estériles

Para lograr una presión negativa en una escombrera en ignición, es preciso usar un sistema de sondeos en el interior de ésta.

En la Fig. 5.3 se pueden ver depósitos con múltiples sondeos de impulsión de aire y uno de salida. El problema es calcular el volumen de escombrera de estéril que puede ser aireada por medio de un sondeo de escape. Esto estabilizará el volumen efectivo de material en combustión controlada. Una aproximación simple para estimar este volumen resulta de aplicar la ley de Darcy a la geometría de los sondeos, considerando la penetración de los gases en el acopio uniforme.

a. PLANTA DE UN SISTEMA MÚLTIPLE DE SONDEOS



b. SECCIÓN VERTICAL DE UN SISTEMA DE SONDEOS

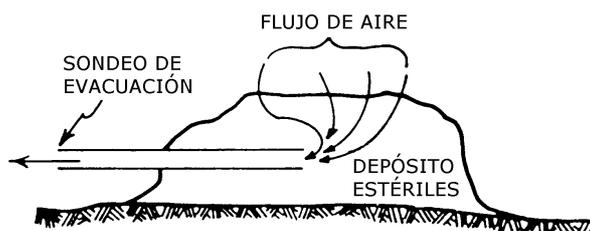


Figura 5.3. Esquema de depósitos de estériles y situación de sondeos.

La ecuación de Darcy para un flujo unidimensional en un medio poroso se puede escribir como:

$$q = \frac{KA}{\mu} (dp/dx)$$

donde:

- q = Caudal de gas (cm³/s)
- K = Permeabilidad del medio poroso (Darcys)
- μ = Viscosidad del gas (centipoises)
- A = Sección efectiva para el flujo (cm²)
- dp/dx = Variación de la presión en el lecho (atm/cm).

Un flujo en el extremo interior del sondeo y un flujo convergente uniforme en el depósito requiere un q constante a través de una sección transversal esférica situada a una distancia x del sondeo. Si β es el ángulo sólido en estereorradianes que define la región del flujo, la sección de área en función de X será:

$$A = 4\beta X^2$$

y

$$q = 4\beta \left(\frac{K}{\mu} \right) X^2 \frac{dp}{dx}$$

considerando constantes q , β y (K/μ) , esta ecuación puede integrarse llegando a:

$$\frac{1}{X_1} - \frac{1}{X_0} = \frac{4\beta}{q} \left(\frac{K}{\mu} \right) (P_0 - P_1)$$

Para la situación de flujo poroso, los límites de integración se pueden tomar como:

$P_1 (K_1) = 1$ atm (presión atmosférica)

$P_0 (X_0 = d) =$ máxima presión negativa a una distancia de igual al diámetro del sondeo y desde el extremo de éste.

Luego:

$$\frac{1}{X_1} = \frac{4\beta}{q} \left(\frac{K}{\mu} \right) (\pm P + \frac{1}{d})$$

donde:

$\pm P =$ es el vacío efectivo (cantidad positiva) que puede ser aplicado a la salida del sondeo.

En la Fig. 5.4 se muestran las soluciones numéricas para varios diámetros de sondeos, donde se han tomado $\mu = 0,02$ cp, $\Delta P = 1$ atm, $\beta = 0,5$ (flujo semiesférico). Las soluciones numéricas son asintóticas.

En volúmenes grandes ardiendo, X será grande, esto es, > 300 cm y q/K tomará el valor mínimo, en estos casos es el límite asintótico:

$$\left(\frac{q}{K} \right)_r = \frac{4\beta \pm P d}{\mu}$$

Escombreras de estériles carbonosos

Por ejemplo, en un depósito de estériles con dimensiones mucho mayores que d , con una permeabilidad de 10^3 Darcys, un caudal de escape de 10^6 cm/s puede ser aireado con un sondeo de salida de gases de 30 cm de diámetro. Se pueden usar mayores caudales de aireación pero sacrificando el volumen efectivo de combustión.

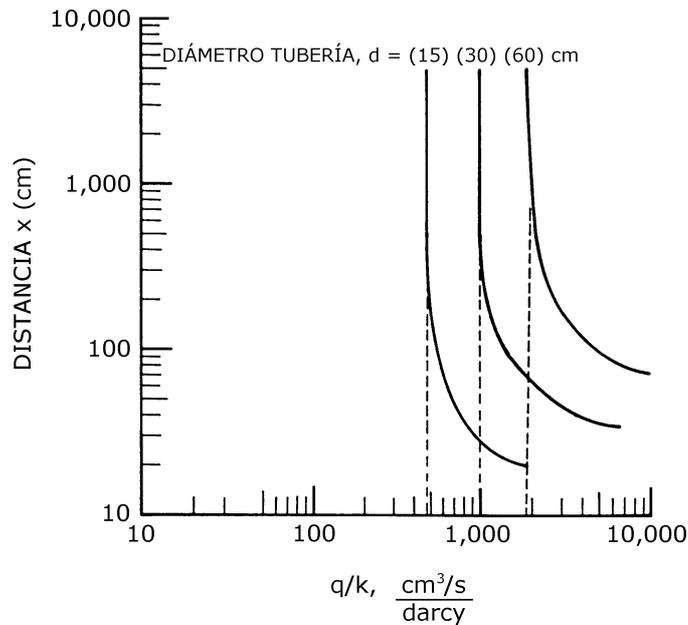


Figura 5.4. Distancia con efecto de presión negativa en una escombrera de estériles.

Por ejemplo, un caudal 3 veces mayor con las mismas condiciones nos da un valor de $X_1 = 100$ cm. En este caso el extremo del sondeo habría que posicionarlo unos 90 cm bajo la superficie del depósito para mantener una presión negativa en la región que arde, esto es, para lograr una combustión completa de los estériles y el escape de los gases.

Esta simple aproximación no ha considerado los efectos del cambio de permeabilidad, zonas de mayor autoignición, etc. Sin embargo, los cálculos están indicados para mantener una presión negativa en la región ardiendo en las escombreras en los que la succión precisa es posible desde el tubo de escape de gases.

5.4. MÉTODOS DE TRATAMIENTO DE ESCOMBRERAS DE ESTÉRILES DE CARBÓN

En este capítulo se describen los métodos de tratamiento de escombreras aplicados hasta la actualidad y los factores que intervienen en la elección de los mismos.

5.4.1. Factores determinantes del método de tratamiento

La elección del método de tratamiento de las escombreras depende de los siguientes factores:

S El tipo de residuo depositado en la escombrera.

- S El tamaño y la naturaleza de la escombrera.
- S La localización.
- S La extensión y velocidad de propagación del fuego.
- S La proximidad a zonas habitadas.
- S La disponibilidad de materiales útiles para la extinción.
- S La maquinaria disponible y los recursos económicos destinados.

Los métodos de extinción y control de incendios en el interior de escombreras que se han utilizado hasta la actualidad son los siguientes:

- S Excavación y remoción de los estériles en combustión.
- S Atrincheramiento de las áreas en combustión.
- S Recubrimiento de la superficie de la escombrera.
- S Inyecciones en profundidad.
- S Compactación superficial.
- S Inundación.

La efectividad probable de estos métodos es, de acuerdo con la experiencia del U.S. Bureau of Mines (1993), siempre inferior al 70 %.

Las líneas de actuación de este organismo, en cuanto a procedimientos de extinción de fuegos, están actualmente dirigidas hacia una metodología de diagnóstico para localizar y registrar a distancia la evolución de los fuegos, así como un método de eliminación del combustible de los residuos y aprovechamiento energético denominado *Método de incendio controlado*.

Los principios básicos de los métodos de extinción de fuegos en escombreras se basan, como en cualquier otro incendio, en el control de los tres elementos protagonistas: el material combustible, el oxígeno y la fuente de ignición.

Para extinguir un fuego es preciso eliminar, al menos, uno de estos elementos. El material combustible es eliminado cuando llega a consumirse o cuando es físicamente separado de la masa en combustión. La eliminación del oxígeno se puede llevar a cabo mediante la introducción de una atmósfera inerte o mediante el aislamiento de la zona del fuego de las fuentes de aire fresco. La eliminación del calor, es decir el enfriamiento del material combustible por debajo del punto de reignición, debe coincidir con cualquier método de eliminación del oxígeno. Esa eliminación de calor puede efectuarse mediante la circulación de un agente absorbente de calor (normalmente un gas inerte o agua) a través de la masa de material depositado. No obstante, es más común permitir que el calor se disipe naturalmente mientras desaparece la combustión.

En algunos casos, si la extinción es técnicamente improbable o económicamente impracticable, una alternativa deseable puede llegar a ser la combustión controlada. Restringiendo la propagación del fuego, aislándolo o ralentizándolo, pueden mejorarse las condiciones de seguridad hasta que el proceso natural consuma todo el combustible y/o se disipe el calor.

5.4.2. Excavación y remoción de los estériles en combustión

La excavación es el método más comúnmente utilizado y el de mayor efectividad para atajar la propagación de los incendios en escombreras.

Escombreras de estériles carbonosos

Esta técnica consiste en excavar y retirar el material que está en combustión, y extenderlo en un sitio apropiado para que se enfríe, Fig. 5.5.

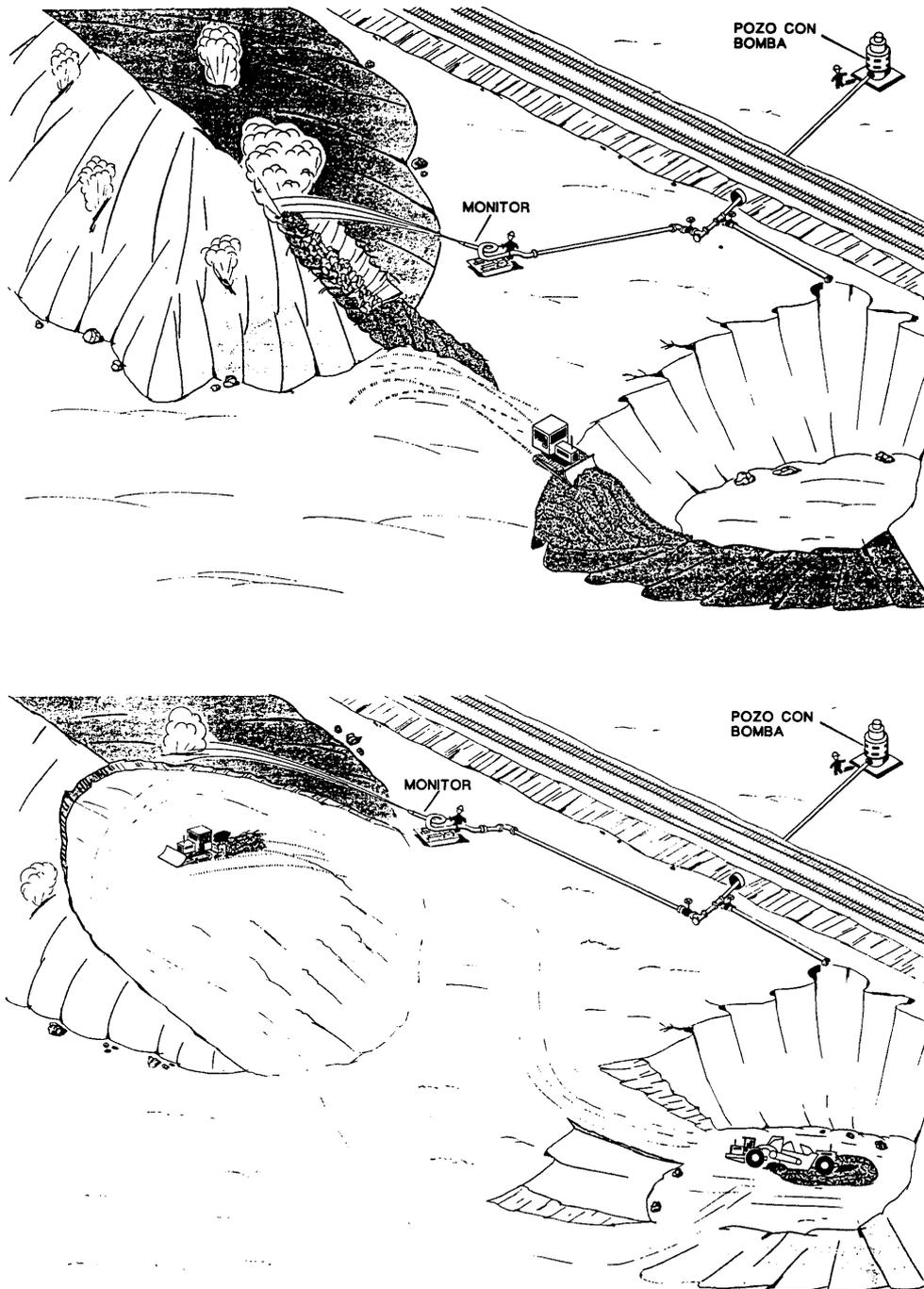


Figura 5.5. Métodos de excavación y remoción de los estériles con el auxilio de un monitor hidráulico.

Después de que el material se ha enfriado, puede acopiarse de nuevo, compactándolo y cubriéndolo con material inerte. Puede ser necesario disponer de dos o más zonas de acopio para seguir un tratamiento secuencial.

La maquinaria utilizada normalmente consiste en equipos típicos de movimiento de tierras, como excavadoras y palas. La excavación de los materiales en combustión puede suponer un riesgo para los operarios de estas máquinas, por lo que en todo momento se deberán tomar las precauciones oportunas.

Por un lado, esa remoción de materiales produce la emisión de gases tóxicos, con una alta concentración de monóxido de carbono y, además, gran cantidad de polvo caliente que puede llegar a generar ocasionalmente explosiones.

La viabilidad de este método depende de numerosos factores como son: el volumen de material a excavar, profundidad a la que se encuentra el material incandescente, disponibilidad de espacio para depositar el material caliente y medios de transporte, presencia de instalaciones, zonas habitadas o vías de transporte próximas.

5.4.3. Atrincheramiento de las áreas en combustión

Este método se aplica para aislar y limitar la extensión del fuego en las escombreras, Fig. 5.6.

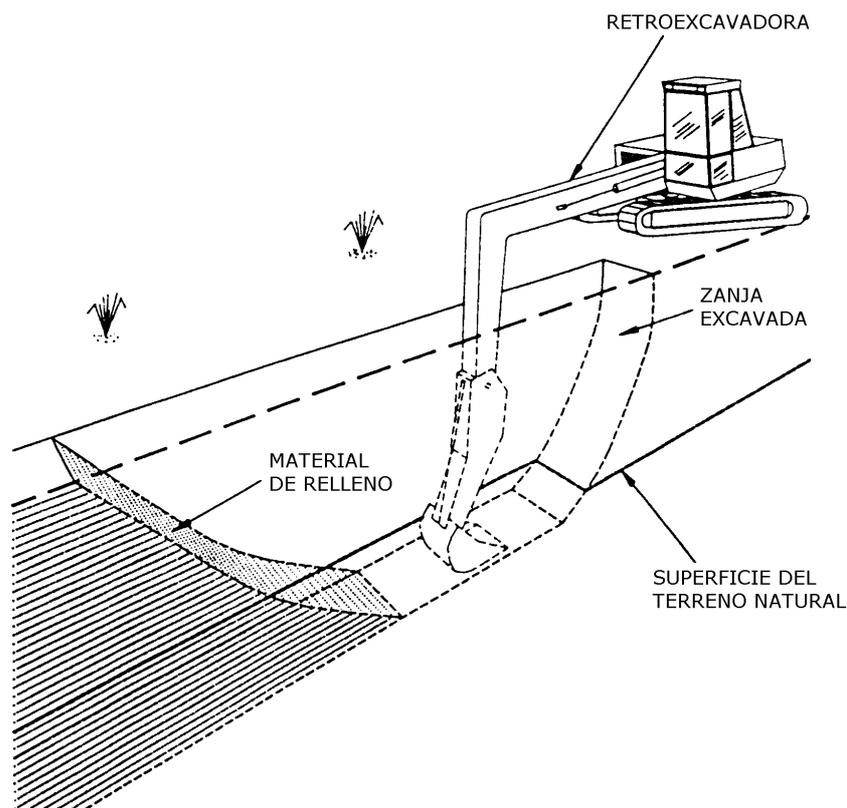


Figura 5.6. Esquema de excavación de una zanja de aislamiento y relleno con material inerte.

Las trincheras deben tener al menos 2 m de ancho y la mayor profundidad posible, lo cual dependerá no sólo de las dimensiones de la masa de estériles en combustión sino incluso del alcance del equipo empleado para estas labores de excavación.

Escombreras de estériles carbonosos

Las trincheras pueden dejarse abiertas para que puedan ser inspeccionadas, o bien rellenarse de caliza u otro material inerte, como arcillas, cenizas pulverizadas o estériles rojos.

5.4.4. Recubrimiento de la superficie de la escombrera

Este método, que es generalmente el más económico, consiste en recubrir la escombrera con una capa de material inerte, como arcilla, arena fina, etc.

La capa de recubrimiento debe ser lo suficientemente gruesa para impedir la entrada de aire en la zona que está en combustión y su entorno inmediato, para forzar así la extinción por falta de oxígeno. La exclusión del aire y la acumulación de los productos de combustión ralentizan la propagación del fuego hasta su extinción.

Si el sellado puede mantenerse mientras se disipe todo el calor almacenado, el fuego puede eventualmente extinguirse. Las roturas de las capas de sellado en superficie pueden estar relacionadas con asentamientos de la escombrera, en parte debidos a que como consecuencia de la combustión las escorias y cenizas resultantes ocupen un menor espacio pudiendo inducir pequeños hundimientos que afectan a la superficie, y por corrimiento de los materiales depositados si la estructura presenta problemas de inestabilidad, dando lugar todo ello a una reactivación de los fuegos.

Las capas de sellado, deben tener un espesor comprendido entre 1 y 2,5 m, siendo las mayores las indicadas para el recubrimiento de superficies inclinadas donde no es posible llegar a una compactación adecuada.

No obstante, la efectividad media obtenida en numerosos proyectos de rehabilitación llevados a cabo en Estados Unidos no llegan a ser superior al 85 %, pues los sellados superficiales se degradan por los siguientes fenómenos:

1. La meteorización gradual que produce el viento que incide en las superficies puede llegar a erosionar la capa de sellado y permitir o, al menos, facilitar la entrada de oxígeno hacia la masa de estériles carbonosos.
2. El agua de escorrentía superficial si adquiere una alta velocidad de circulación, como sucede sobre las superficies de los taludes, puede producir el arrastre del material de recubrimiento y la creación sobre las capas de sellado de incisiones profundas en forma de cárcavas e incluso torrenteras, permitiendo en dichos puntos la entrada del oxígeno necesario para la combustión.
3. La temperatura interna del depósito de residuos puede llegar a producir sobre la capa de sellado un endurecimiento acompañado de agrietamiento y fisuración.
4. La soldadura que se produce entre las partículas de material que entran en combustión produce escorias y cenizas con un volumen inferior al original, que se detectan sobre las capas de sellado en forma de pequeñas depresiones superficiales. El peso del material que gravita sobre los huecos, o el debido a maquinaria, personas o animales que circulen eventualmente sobre esas zonas pueden llegar a provocar hundimientos, haciendo desaparecer el efecto de la capa de sellado.

El recubrimiento a veces se utiliza de forma complementaria con otros métodos, como el de atrincheramiento, para poder prevenir y controlar más eficazmente el fuego.

El sellado superficial, si se mantiene adecuadamente durante un tiempo prolongado (10 ó 20 años) permite extinguir totalmente los fuegos. Ésta es la experiencia del U.S. Bureau of Mines, después de haber intervenido en numerosas escombreras.



Foto 5.2. Recubrimiento del talud de una escombrera con estériles rojos.

5.4.5. Inyecciones en profundidad

Ésta es una medida de control que consiste en inyectar en profundidad lechadas de cal, arcilla o cemento, en la zona donde se está produciendo la combustión.

La lechada de cal es el método más utilizado, porque cuando se calienta produce CO_2 , el cuál priva de oxígeno al fuego. Por otro lado la cal residual actúa como producto neutralizante de los efluentes ácidos que pudieran producirse como consecuencia de las filtraciones de agua.

Los materiales inertes de inyección tienen como misión rodear a la masa en combustión rellenando los intersticios que quedan entre las partículas del estéril, limitando la cantidad de oxígeno que accede a dicha masa y absorbiendo parte del calor.

Ese material incombustible, si se coloca adecuadamente, llega a formar una barrera frente a la propagación del fuego.

Las inyecciones son apropiadas como medida de control para impedir que se extienda el fuego por toda la escombrera. Debe tenerse cuidado en aquellas zonas en las que la temperatura es muy alta, ya que se corre el riesgo de que se produzca explosión. En este caso las inyecciones no son aconsejables.

Escombreras de estériles carbonosos

Una particularidad de algunos tipos de inyección, como son las de lechada de cemento, es la mejora de las propiedades resistentes de los estériles con los que se mezcla, evitándose así problemas de inestabilidad.

Para alcanzar la máxima efectividad la inyección con cualquier material sellante debe ser completa, encapsulando a toda la masa de material incandescente aislándolo del resto de materiales combustibles, al tiempo que debe ser estable durante el período de tiempo necesario para el enfriamiento del material.

5.4.6. Compactación superficial

Para fuegos situados cerca de la superficie, la compactación es un método apropiado para limitar la entrada de oxígeno.

La principal limitación de este método radica en la capacidad de trabajar los equipos en superficies con fuertes pendientes. Así en plataformas horizontales no suelen presentarse problemas, mientras que en las caras de los taludes, donde es más frecuente que aparezcan los fuegos, de aplicarse esta técnica sería preciso asegurar con cables los compactadores para evitar cualquier riesgo de vuelco, y siempre trabajando según líneas de máxima pendiente.

5.4.7. Inundación

Este método se basa en el uso de agua para disminuir la temperatura del material que se está quemando, de esta manera se paraliza la reacción de combustión por la exclusión del oxígeno. Generalmente, lo que se hace es crear pequeñas presas de tierra para mantener el nivel de agua cubriendo el depósito de estériles o la parte de éste que presenta problemas.

Este método se limita a fuegos de pequeña extensión y próximos a la superficie.

5.4.8. Ausencia de actuaciones

En localizaciones aisladas o donde el fuego es pequeño, y su potencial de expansión está limitado, puede ser aconsejable no actuar y esperar a que el material combustible se consuma.

5.4.9. Inyecciones criogénicas

El uso de líquidos criogénicos para rebajar la temperatura de los estériles carbonosos es un procedimiento nuevo que se está investigando actualmente en los Estados Unidos.

Las ventajas que presentan estos líquidos son una distribución uniforme en la masa a tratar y la expansión anisotrópica de un gas frío refrigerante.

Los ensayos que se han llevado a cabo han consistido en usar nitrógeno líquido como medio de transferencia del calor, habiéndose comprobado que si los estériles están húmedos la formación de hielo durante la inyección criogénica podría contener y dirigir el flujo del nitrógeno líquido.

Dentro de las investigaciones efectuadas se ha diseñado y construido un equipo para bombear una mezcla de nitrógeno líquido y partículas sólidas de CO₂. Esta mezcla tiene las propiedades de distribución de un líquido.

Cuando el nitrógeno se evapora, las partículas de CO₂ permanecen en el sitio. La aplicación práctica de este método no puede determinarse en este momento, pues se encuentra en fase de desarrollo, pero abre nuevas expectativas como técnica de tratamiento de escombreras en ignición. El empleo de la misma dependerá, en parte, del coste del gas y de la disponibilidad de líquidos criogénicos.

5.5. CRITERIOS PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESCOMBRERAS DE ESTÉRILES DE CARBÓN CON RIESGO DE IGNICIÓN

A continuación se dan una serie de recomendaciones básicas para la implantación y construcción de escombreras, dirigidas a prevenir los problemas de autocombustión de los estériles carbonosos.

5.5.1. Emplazamiento

- S Las escombreras deben ubicarse preferentemente sobre terrenos llanos o con suave pendiente, que puedan constituir un cimiento firme, estable y poco deformable y dificultar el movimiento de masas de escombros.
- S Debe evitarse que dentro de la zona de influencia de la escombrera se encuentren instalaciones, viviendas o vías de comunicación. Se define como zona de influencia aquella que puede verse afectada por caídas de escombros, deslizamientos globales o parciales, etc. Dicha zona será tanto mayor cuanto más finos sean los estériles y mayor la pendiente original del terreno.

5.5.2. Preparación del terreno

- S El emplazamiento de una escombrera debe ser limpiado de toda especie vegetal y levantados los horizontes superficiales para su posterior uso en la restauración.
- S En las zonas de fuerte pluviosidad se dispondrá de una red de captación de aguas sobre la superficie de apoyo de la escombrera, con el fin de disminuir las presiones intersticiales en el interior de la masa de escombros, Fig. 5.7.
- S Las zanjas o canales de drenaje se realizarán con una pendiente mayor de 0,2 %, aunque en el caso de suelos muy inclinados la pendiente se limitará al mínimo para disminuir los efectos erosivos. Las zanjas no deberán tener una profundidad superior a 1,5 m.
- S Las tuberías deberán estar asentadas sobre un lecho de material granular de filtro, debiendo resistir las tensiones inducidas por los movimientos de la escombrera, si los hubiera.
- S Los cursos de agua superficiales en el área de la escombrera deberán ser desviados. Para ello se excavarán canales de interceptación que impidan la entrada de tal fluido en el depósito de estériles. Dicho canal deberá revestirse en el caso de no garantizar la debida impermeabilidad.

Escombreras de estériles carbonosos

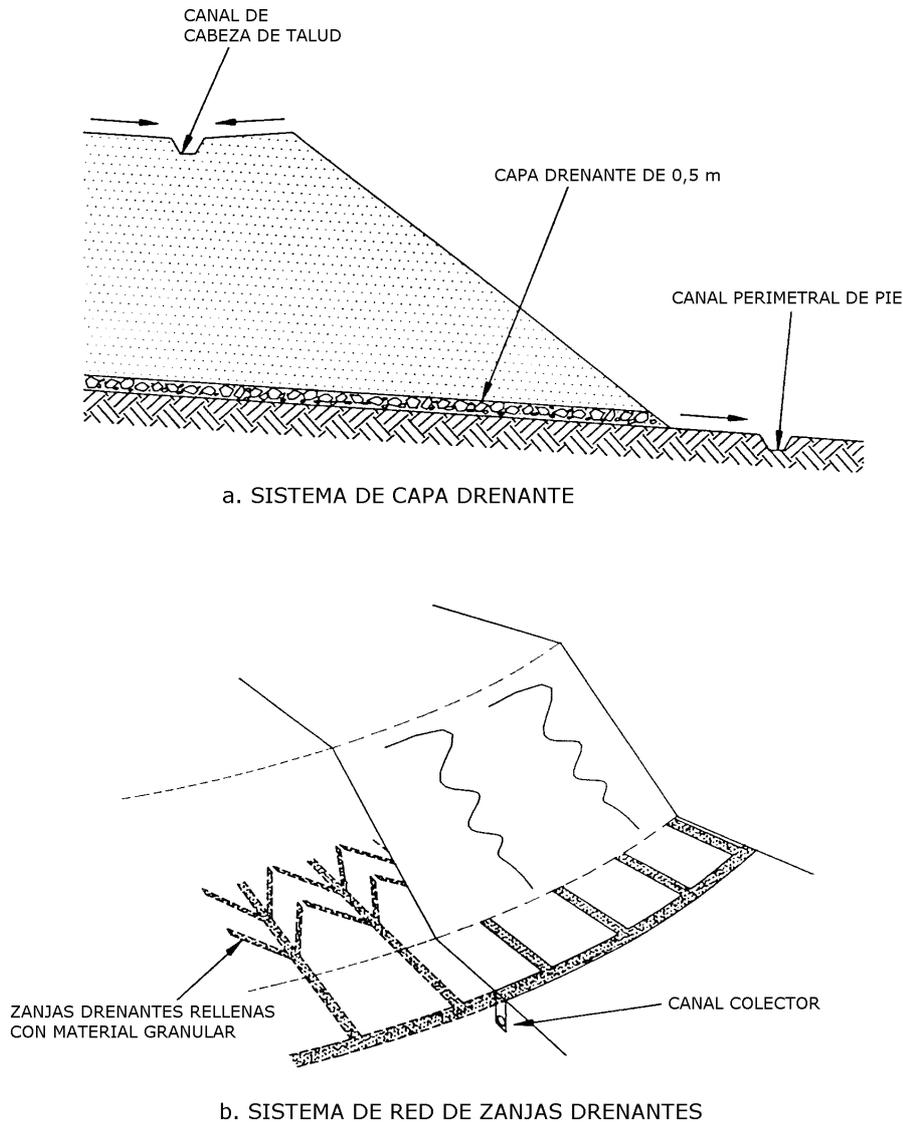


Figura 5.7. Sistemas de drenaje utilizados en escombreras.

5.5.3. Sistema de vertido

- S El vertido por gravedad, Fig. 5.8, no deberá practicarse, ya que los taludes así formados presentan unos coeficientes de seguridad próximos a la unidad y, por lo tanto, pequeñas variaciones del nivel freático pueden afectar a su estabilidad. De no poderse practicar otro método se deberán tomar ciertas precauciones, como son la creación de una base de apoyo con material grueso con el fin de garantizar unas buenas condiciones de drenaje, empujar los estériles depositados por los camiones mediante un tractor y crear ciertos diques iniciales en las bases para evitar corrimientos.
- S La compactación de los estériles vertidos, Fig. 5.9, además de mejorar las propiedades resistentes, disminuye el índice de huecos, con lo cual se aprovecha mejor el volumen de la escombrera y se disminuye el riesgo de autocombustión.

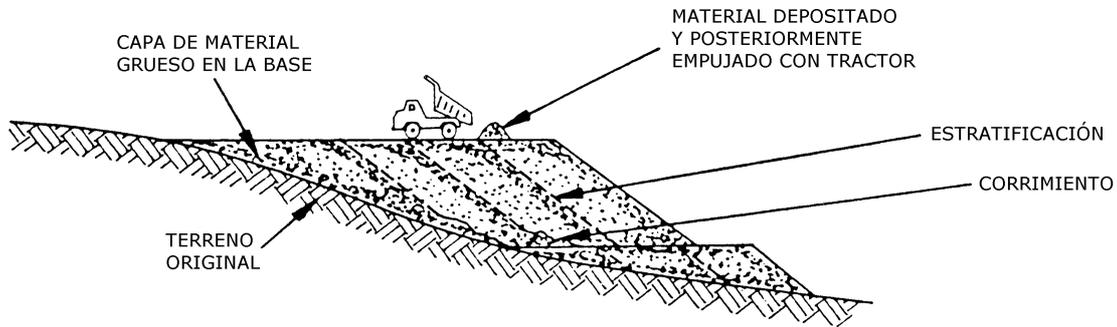


Figura 5.8. Vertido por gravedad.

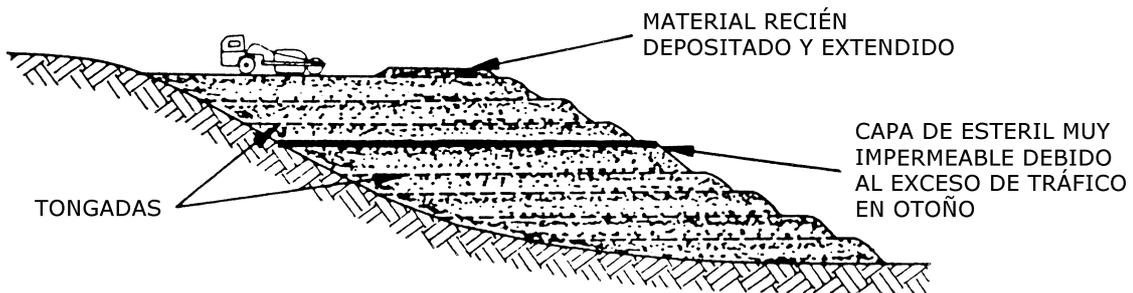


Figura 5.9. Vertido en tongadas compactadas.

- S En general los estériles carbonosos deberían verse en capas con un espesor inferior a 0,5 m y compactarse siempre mediante cuatro o cinco pasadas de un rodillo que tenga un peso no inferior a 5 t por metro de ancho.

La práctica operativa puede consistir en apilar el escombro en pequeños montones, para luego irlos extendiendo y compactando. La experiencia demuestra que con los equipos actuales de compactación el extendido en capas de menos de 50 cm permite conseguir sin dificultad una densidad seca superior al 90 % de la densidad Proctor normal.

Este sistema de vertido puede plantear ciertos problemas para las máquinas de movimiento de tierras, al formarse rodadas, si la humedad de los estériles es superior al 15 %.

- S Cuando se trate de estériles que no presenten problemas de autocombustión las capas o tongadas podrán alcanzar espesores de hasta 5 m.

Escombreras de estériles carbonosos

- S Además del vertido en capas, para evitar la posible propagación del fuego en el interior de la escombrera, podrán construirse por el procedimiento de *células con aislamiento*, Fig. 5.10, de manera que cada una de las células esté recubierta toda ella por una capa de material inerte compactado y de baja permeabilidad, de aproximadamente 1 m de espesor.

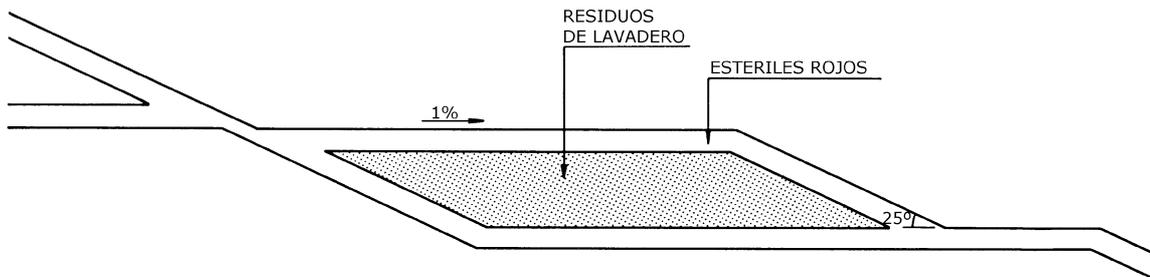


Figura 5.10. Sección transversal de una célula conteniendo los estériles carbonosos.

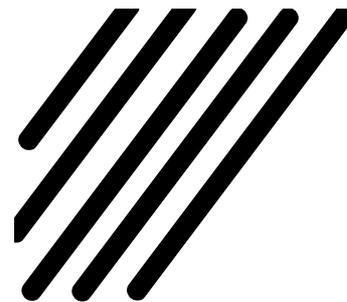
- S Simultáneamente con la construcción de la escombrera se llevarán a cabo las labores de revegetación, extendiendo sobre las superficies finales una capa de tierra vegetal, de unos 50 cm, para proceder posteriormente a la siembra o plantación de las especies vegetales seleccionadas.
- S Los bancos finales no deberán tener una altura superior a los 5 m y las bermas tendrán una anchura mínima de 5 m. Los taludes finales podrán ser de unos 26° en las escombreras de llanura y de unos 22° en las escombreras de ladera.



Foto 5.3. Construcción de una célula con estériles extendidos y compactados.

5.1. INTRODUCCIÓN	5-1
5.2. ORIGEN DE LA COMBUSTIÓN DE ESTÉRILES DE CARBÓN Y RIESGOS QUE IMPLICA ...	5-3
5.2.1. Factores implicados	5-3
5.2.2. Ignición espontánea	5-3
5.2.3. Ignición accidental	5-5
5.2.4. Riesgos intrínsecos de las escombreras en combustión	5-6
5.3. EVALUACIÓN DEL RIESGO DE COMBUSTIÓN ESPONTÁNEA	5-12
5.3.1. Poder calorífico (PC)	5-12
5.3.2. Pérdida en peso durante la combustión	5-13
5.3.3. Potencial de combustión	5-13
5.3.4. Cambio en las condiciones de la zona de vertido	5-13
5.3.5. Temperatura	5-13
5.3.6. Indicadores de superficie	5-15
5.3.7. Modelo del proceso de autocombustión de depósitos de estériles de carbón	5-16
5.4. MÉTODOS DE TRATAMIENTO DE ESCOMBRERAS DE ESTÉRILES DE CARBÓN	5-20
5.4.1. Factores determinantes del método de tratamiento	5-20
5.4.2. Excavación y remoción de los estériles en combustión	5-21
5.4.3. Atrincheramiento de las áreas en combustión	5-23
5.4.4. Recubrimiento de la superficie de la escombrera	5-24
5.4.5. Inyecciones en profundidad	5-25
5.4.6. Compactación superficial	5-26
5.4.7. Inundación	5-26
5.4.8. Ausencia de actuaciones	5-26
5.4.9. Inyecciones criogénicas	5-26
5.5. CRITERIOS PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESCOMBRERAS DE ESTÉRILES DE CARBÓN CON RIESGO DE IGNICIÓN	5-27
5.5.1. Emplazamiento	5-27
5.5.2. Preparación del terreno	5-27
5.5.3. Sistema de vertido	5-28

capítulo 6



ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE ESCOMBRERAS

6.1. INTRODUCCIÓN

Los análisis de estabilidad de taludes tales como los que se realizan en las escombreras de estériles mineros, es uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta tanto en su diseño como durante la construcción y vida útil del depósito. Con este fin, se han desarrollado diversos métodos, modelos y sistemas de evaluación de la estabilidad que ayudan a minimizar los errores y a garantizar la suficiente seguridad frente a posibles roturas.

En este sentido, cabe destacar que la estabilidad de taludes es analizada, normalmente, por los métodos denominados de equilibrio límite a partir de los datos de resistencia del suelo, sin tener en cuenta su comportamiento tensional, y dando como resultado un factor de seguridad. Por otro lado, para estimar la magnitud del movimiento de los taludes se recurrirá a la utilización de métodos de elementos finitos, donde la definición de las tensiones sufridas por el suelo toma un papel muy importante. La aplicabilidad de estos y otros métodos de análisis de estabilidad es, en la mayoría de los casos, de carácter general, dándose aplicaciones de tipo particular y concreto en otros que serán posteriormente descritos.

A lo largo de este capítulo se realizará una descripción detallada de los métodos más habitualmente utilizados en la estabilidad de taludes, así como ilustrar otros tipos de métodos más innovadores. La utilización de uno u otro método de análisis vendrá definida por las características de la obra en estudio, tales como la geometría, el tipo de material de construcción o la presencia de agua, además de los parámetros que se deseen obtener en cada caso para determinar la estabilidad de las escombreras.

6.2. FACTORES QUE AFECTAN A LA ESTABILIDAD

Existe una serie de factores que influyen sobre la estabilidad de una escombrera, entre los principales se pueden citar: configuración de la escombrera, pendiente del cimiento y grado de confinamiento, tipo de cimiento, propiedades del material vertido, método constructivo, condiciones climatológicas y piezométricas, ritmo de vertido y grado de sismicidad del lugar.

Análisis de estabilidad de escombreras

A. Configuración de la escombrera

El tamaño y la configuración de una escombrera tiene una relación directa sobre la estabilidad y el riesgo de rotura de la misma. Entre las variables geométricas a analizar está la altura de vertido, el volumen y el talud de vertido.

Altura de vertido. Es la distancia vertical entre la cresta de la escombrera y la superficie del terreno sobre la cual está apoyada la escombrera. Este valor puede variar desde unos 20 m hasta superar los 400 m.

Volumen vertido. Comúnmente expresado en m³ banco, se agrupan en pequeño (< 1 Mm³), medio (1 a 50 Mm³) y grande (> 50 Mm³).

Talud de vertido. Es el ángulo que forma la horizontal con la línea que va desde la cresta hasta el pie de la escombrera. Para conseguir la estabilidad de la escombrera, y dependiendo del grado de cohesión del material vertido, este ángulo puede ir desde los 26 ° hasta los 37 °.

B. Pendiente del cimientado y grado de confinamiento

Ambos factores proporcionan estabilidad a la escombrera. Existirá un menor riesgo de deslizamiento o rotura de la estructura cuando la pendiente del cimientado no supere los 10° y se coloquen rellenos de contención en el pie de la escombrera.

C. Tipo del cimientado

Debido a que es el punto de contacto entre las estructuras y el terreno, las condiciones del cimientado se configuran como el principal factor que aporta estabilidad a una escombrera. Se puede clasificar en tres tipos: competente (materiales resistentes), medio (suelo que gana resistencia por consolidación) y débil (suelos blandos con surgencias de agua).

D. Calidad del material vertido

Las propiedades de los materiales depositados en las escombreras, como clasificación granulométrica, durabilidad y resistencia, determinan su calidad y el grado de estabilidad de la escombrera. Se considera material de buena calidad cuando se refiere a rocas resistentes, poco alteradas y que contienen menos del 10 % de partículas finas.

E. Método de construcción

Generalmente las escombreras se construyen mediante una serie de plataformas en sentido ascendente o descendente. La ventaja de una secuencia ascendente es que el pie de cada plataforma estará soportada por la plataforma inferior, lo que favorece la estabilidad de la estructura. En la elección del método constructivo de una escombrera hay que tener en cuenta la distancia de transporte, la forma de vertido, el

grado de accesibilidad, la capacidad disponible y la estabilidad requerida. Para mejorar la estabilidad de una escombrera se puede recurrir al aterrazado y a la formación de plataformas de poca altura con vertidos desde los contornos de la misma.

F. Condiciones piezométricas y climatológicas

La aparición de filtraciones en el cimientado y en el interior de la escombrera genera un riesgo potencial de desestabilización. Los climas lluviosos y la caída de nieve sobre las escombreras afectan de igual forma a la creación de superficies freáticas.

Si los niveles freáticos formados en el interior de la escombrera interceptan el ángulo de reposo del material, se pueden crear situaciones críticas que pueden desestabilizar la estructura. Para evitar esta situación, es conveniente realizar un estudio de las características del material y de las condiciones hidrogeológicas e hidrológicas del lugar.

La generación de altas presiones intersticiales en el cimientado provocadas por el vertido, se pueden disipar mediante un adecuado diseño constructivo de la escombrera y la eliminación de materiales finos y blandos del cimientado.

G. Ritmo de vertido

Una causa de rotura de las escombreras es la debida a los ritmos intensos de vertido o de avance de la cresta, ya que generan una elevada presión intersticial en el cimientado y no hay tiempo suficiente para la consolidación de los materiales vertidos ni para desarrollar una adecuada resistencia que garantice la estabilidad de la escombrera.

H. Sismicidad

El mayor impacto que puede generar un movimiento sísmico natural sobre las escombreras es la licuefacción de sus materiales, aunque el mismo efecto también lo puede producir la presencia de materiales finos y las voladuras. Para corregir este inconveniente, habrá que elegir un diseño que garantice la estabilidad de la escombrera en zonas sísmicas.

6.3. CLASIFICACIÓN DEL GRADO DE ESTABILIDAD DE LAS ESCOMBRERAS. INDICE INESTEC

Una forma de valorar el grado de estabilidad de una escombrera, consiste en asignar una puntuación a cada uno de los factores que afectan a la estabilidad de la misma, Tabla 6.1. En función de un intervalo de las distintas condiciones se hace una descripción cualitativa y se le puntúa según un rango de valores. El grado de estabilidad total de la escombrera se calcula sumando los valores individuales de todos los factores, la puntuación máxima que se puede alcanzar es 1800.

Teniendo en cuenta los diversos factores y sus interrelaciones se deben identificar las actuaciones

Análisis de estabilidad de escombreras

desestabilizantes de una escombrera. Por sí solos estos factores no permiten realizar una fácil valoración cuantitativa, por ello, la clasificación de estabilidad de la escombrera resulta bastante subjetiva.

La clasificación presentada en la Tabla 6.1 es de uso fácil y considera un acertado rango de aplicación, pero, al ser un concepto nuevo, puede ser mejorado mediante ajustes y muestreos.

TABLA 6.1. Clasificación de estabilidad de escombreras.

FACTORES PRINCIPALES QUE AFECTAN A LA ESTABILIDAD		DESCRIPCIÓN O INTERVALO DE CONDICIONES		CALIFICACIÓN
CONFIGURACIÓN DE LA ESCOMBRERA	Altura de vertido	Pequeña Media Grande Muy grande	< 50 50 m - 100 m 100 - 200 m > 200 m	0 50 100 200
	Volumen vertido	Pequeño Medio Grande	< 1 Mm ³ 1 - 50 Mm ³ > 50 Mm ³	0 50 100
	Talud de vertido	Tendido Medio Escarpado	< 26° 26° - 35° > 35°	0 50 100
PENDIENTE DEL CIMIENTO	Suave Medio Escarpado Extremo	< 10° 10° - 25° 25° - 32° > 32°	0 50 100 200	
GRADO DE CONFINAMIENTO	Confinada	<ul style="list-style-type: none"> Talud cóncavo en planta o perfil Relleno de valle o vaguada, con berma de contención en pie Aterrazado del cimiento de apoyo 	0	
	Moderadamente confinada	<ul style="list-style-type: none"> Banqueo natural o aterrazado del talud Taludes variables, diversidad topográfica natural limitada Vertidos en vaguadas, en fondo de valle, en ladera o exenta 	50	
	No confinada	<ul style="list-style-type: none"> Talud convexo en planta o perfil Vertido en ladera o divisoria sin confinamiento No aterrazado o banqueo en el desarrollo 	100	
TIPO DE CIMIENTO	Competente	<ul style="list-style-type: none"> Materiales de la base de apoyo resistentes o muy resistentes frente a los estériles vertidos No sometidos a presiones de poro adversas Estructura geológica favorable 	0	
	Medio	<ul style="list-style-type: none"> Intermedio entre competente y débil Suelo que gana resistencia con la consolidación Presión de poros que se disipa con ritmo de carga controlada 	100	
	Débil	<ul style="list-style-type: none"> Suelos blandos, capacidad portante blanda Presión de poro adversa bajo carga Condiciones hidrológicas adversas, surgencias y manantiales Resistencia sensible a esfuerzos cortantes, licuefacción potencial 	200	

Análisis de estabilidad de escombreras

CALIDAD DEL MATERIAL VERTIDO	Alta	<ul style="list-style-type: none"> Resistente y durable Menos de 10 % finos 	0
	Media	<ul style="list-style-type: none"> Resistencia media, durabilidad variable 10 % al 25 % finos 	100
	Mala	<ul style="list-style-type: none"> Predominantemente rocas débiles de baja durabilidad Más del 25 % finos, estériles de cobertera 	200
MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN	Favorable	<ul style="list-style-type: none"> Tongadas menores de 25 m, plataformas amplias Vertido desde los contornos Construcción ascendente Banqueado a aterrazado 	0
	Combinada	<ul style="list-style-type: none"> Tongadas entre 25 y 50 m Método de construcción combinado 	100
	Desfavorable	<ul style="list-style-type: none"> Tongadas grandes > 50 m, plataformas estrechas Vertido libre siguiendo líneas de rotura del talud Construcción descendente 	200
CONDICIONES PIEZOMÉTRICAS	Favorables	<ul style="list-style-type: none"> Presiones piezométricas bajas, sin filtraciones en cimentación Aparición improbable de superficie freática en la escombrera Precipitaciones bajas Infiltración pequeña en la escombrera Inexistencia de nieve o hielo en escombrera o cimiento 	0
	Medias	<ul style="list-style-type: none"> Presión piezométrica media, algunas filtraciones en el cimiento Posible desarrollo limitado de superficie freática en la escombrera Precipitaciones medias Alta infiltración en escombreras Capas de nieve o hielo discontinuas en escombrera 	100
	Desfavorables	<ul style="list-style-type: none"> Presiones piezométricas altas Fuertes precipitaciones Potencial alto de desarrollo de superficies freáticas o niveles de aguas colgadas en la escombrera Capas de nieve o hielo continuas sobre la escombrera o cimentación 	200
RITMO DE VERTIDO	Bajo	<ul style="list-style-type: none"> Menor de 25 m³ por m lineal de cresta por día Ritmo de avance de la cresta < 0,1 m por día 	0
	Medio	<ul style="list-style-type: none"> De 25 a 200 m³ por m lineal de cresta por día Ritmo de avance de la cresta de 0,1 a 1 m por día 	100
	Alto	<ul style="list-style-type: none"> Más de 200 m³ por metro lineal de cresta por día Ritmo de avance > 1,0 m por día 	200
SISMICIDAD	Bajo	<ul style="list-style-type: none"> Sismicidad baja 	0
	Medio	<ul style="list-style-type: none"> Sismicidad media 	50
	Alto	<ul style="list-style-type: none"> Sismicidad alta 	100
CALIFICACIÓN MÁXIMA POSIBLE DE ESTABILIDAD			1800

Para simplificar la clasificación de estabilidad de las escombreras en función al riesgo de rotura y el nivel de esfuerzo, se pueden agrupar en cuatro clases, Tabla 6.2. En esta tabla se presentan algunas recomendaciones que se deben tener en cuenta a la hora de diseñar y construir una escombrera, ya que está basada en experiencias con las que se ha estudiado la probabilidad de inestabilidad o de rotura de las

Análisis de estabilidad de escombreras

escombreras. Esta clasificación también ayuda a la evaluación y comparación de las distintas alternativas de configuración y del lugar de emplazamiento de las escombreras.

Además, en la Tabla 6.3 se presentan los requerimientos de inspección, auscultación e información necesarios.

TABLA 6.2. Clases de estabilidad de escombreras y actuaciones recomendadas.

CLASE DE ESTABILIDAD DE ESCOMBRERA	RIESGO DE ROTURA	RECOMENDACIONES PARA LA INVESTIGACIÓN, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN	CALIFICACIÓN DE ESTABILIDAD DE LA ESCOMBRERA (INESTEC)
I	Inexistente	<ul style="list-style-type: none"> Reconocimiento básico del emplazamiento. Documentación básica Escasos ensayos de laboratorio Comprobación rutinaria de estabilidad, posiblemente usando ábacos Restricciones mínimas en la construcción Auscultación visual exclusivamente 	< 300
II	Bajo	<ul style="list-style-type: none"> Reconocimiento del emplazamiento general Pueden requerirse pozos en el terreno y toma de muestras Algunos ensayos de laboratorio La estabilidad puede o no influir en el diseño Se requiere análisis de estabilidad básico Restricciones limitadas en la construcción Auscultación con instrumentos y visual rutinaria 	300 - 600
III	Medio	<ul style="list-style-type: none"> Investigación del emplazamiento detallada Pueden requerirse pozos, sondeos y otras investigaciones in-situ Pueden necesitarse muestras inalteradas Ensayos de laboratorio detallados, incluyendo propiedades índice, resistencia al corte, durabilidad, etc. La estabilidad influye y afecta al diseño Análisis de estabilidad detallado, requiriendo posiblemente un estudio paramétrico Puede ser necesario un diseño detallado para su aprobación y certificado de clausura Restricciones moderadas en la construcción (e.g. ritmo de vertido, altura de recrecimiento, calidad de materiales, etc.) Auscultación con instrumentación amplia para confirmar el diseño, documentar el comportamiento y establecer límites de carga 	600 - 1200
IV	Alto	<ul style="list-style-type: none"> Investigación del emplazamiento detallada Pueden requerirse pozos y calicatas Pueden necesitarse sondeos y posiblemente otras investigaciones in-situ Se necesitan muestras inalteradas Ensayos de laboratorio detallados, incluyendo propiedades índice, resistencia al corte, durabilidad, etc. Consideraciones generales de estabilidad Análisis de estabilidad detallado, requiriendo posiblemente un estudio paramétrico y posiblemente una evaluación completa de alternativas Puede ser necesario un diseño detallado para su aprobación y certificado de clausura Severas restricciones en la construcción (e.g. limitación en los ritmos de vertido, altura de recrecimiento, calidad de los materiales, etc.) Auscultación con instrumentos amplia para confirmar el diseño, documentar el comportamiento y establecer límites de carga 	> 1200

Análisis de estabilidad de escombreras

TABLA 6.3. Requerimientos de inspección, auscultación e información.

CLASE DE ESTABILIDAD DE ESCOMBRERA	CALIFICACIÓN DE ESTABILIDAD DE LA ESCOMBRERA	REQUERIMIENTOS				
		INSTRUMENTACIÓN DE AUSCULTACIÓN	PARTE DE RELEVO	INSPECCIÓN		DOCUMENTO
				DESCRIPCIÓN	FRECUENCIA	
I	< 300	Inspección visual Detección movimientos inesperados Piezómetros cuando sean aplicables	Sí	Inspección por el jefe del relevo	4 h	Parte de relevo
				Inspección periódica detallada por el ingeniero responsable	Anual	Informe anual
II	300 - 600	Instrumentación necesaria si se identifican movimientos distintos a los de hundimiento por consolidación Piezómetros cuando sean aplicables	Sí	Inspección por el jefe de relevo	4 h	Parte de relevo
				Si se efectúa auscultación, inspección e interpretación de los datos registrados por el ingeniero responsable	Diaria	Inspección cuatrimestral
				Inspección detallada periódica por el ingeniero responsable	Cuatrimestral	Informe anual
III	600 - 1200	Instrumentación para auscultar movimientos tal como se haya especificado por el consultor proyectista Piezómetros cuando sean aplicables	Sí	Inspección por el jefe de relevo	4 h	Parte de relevo
				Si se efectúa auscultación, inspección e interpretación de los datos registrados por el ingeniero responsable	Diaria	
				Inspección detallada periódica por el ingeniero responsable	Mensual	Inspección cuatrimestral
				Inspección por un técnico consultor independiente	Anual	Informe anual del consultor independiente
IV	> 1200	Programa de instrumentación detallado a ser especificado por el consultor proyectista Piezómetros cuando sean aplicables Piezómetros probablemente necesarios en la cimentación, si existe cualquier suelo de grano fino	Sí	Inspección por el jefe de relevo	4 h	Parte de relevo
				Si se efectúa auscultación, inspección e interpretación de los datos registrados por el ingeniero responsable	Diaria	Inspección cuatrimestral
				Inspección detallada periódica por el ingeniero responsable	Mensual	Informe anual del consultor independiente, frecuentemente a petición de la Autoridad Minera
				Inspección por un técnico consultor independiente	Anual (mínimo)	

Análisis de estabilidad de escombreras

En la Tabla 6.4 se presenta un resumen de la clasificación de estabilidad de dos escombreras. De ésta se deduce que la escombrera 2 alcanza una puntuación de 1300 y está considerada como de Clase IV, con lo que se obtiene una categoría de alto riesgo, por lo que se requerirán unos estudios de laboratorio y de campo, así como un análisis completo y detallado del diseño constructivo del lugar de emplazamiento y de la configuración de la escombrera.

TABLA 6.4. Ejemplo de aplicación.

FACTORES QUE AFECTAN A LA ESTABILIDAD	ESCOMBRERA 1		ESCOMBRERA 2	
	Descripción	Calificación	Descripción	Calificación
Altura de vertido	25 m	0	250 m	200
Volumen vertido	3 Mm ³	50	3 Mm ³	50
Talud de vertido	37°	100	26°	50
Pendiente del cimiento	10° - 15°	50	25° - 30°	100
Grado de confinamiento	Confinada	0	Moderadamente confinada	50
Tipo de cimiento	Competente	0	Débil	200
Calidad del material vertido	Alta	0	Mala	200
Método de construcción	Tongadas de 25 m (Favorable-combinada)	50	Tongadas de 40 m Vertido desde los contornos (Combinada)	100
Condiciones piezométricas	Buena segregación Sin surgencias de agua (Favorable)	0	Talud saturado en pie Caída de rocas en talud (Desfavorable)	200
Ritmo de vertido	20 Mm ³ por m lineal de cresta por día	0	120 Mm ³ por m lineal de cresta por día	100
Sismicidad	Baja	0	Media	50
Calificación en la estabilidad de escombrera		250		1.300
Clase de estabilidad de escombrera		I		IV

6.4. EVALUACIÓN DE RIESGOS

El riesgo se puede definir como el producto entre la probabilidad de ocurrencia (azar) y la severidad de las consecuencias (exposición). El azar se mide en términos de frecuencia, en probabilidad de ocurrencia o en magnitud de eventos adversos, mientras que la exposición se mide en función al grado de cercanía, al período de exposición y al impacto potencial.

La evaluación del riesgo de una escombrera puede ayudar a mejorar su seguridad y las condiciones medioambientales porque previene y pone los medios para disminuir la probabilidad de accidentes por fenómenos internos (surgencias, escapes, asentamientos, roturas, etc.), o externos que, indudablemente, tienen un efecto negativo sobre el entorno.

Por lo general, en las escombreras existen dos fuentes de riesgo: la estabilidad física (rotura de la escombrera) y la estabilidad química (formación de aguas ácidas).

El grado de estabilidad química permite evaluar el grado de inestabilidad pero no el tiempo de exposición. Por tanto, el valor del grado de estabilidad en escombreras, por sí solo, no da una medida global del riesgo, por lo que, para un mejor tratamiento del riesgo, es necesario cuantificar el tiempo de exposición.

Según el tipo de actuación y el método de control del riesgo, se pueden agrupar en tres áreas: seguridad de personas y equipos, riesgo en instalaciones y riesgo medioambiental.

6.4.1. Seguridad de personas y equipos

Uno de los aspectos principales que afectan a la operación de vertido en una escombrera es la seguridad del personal y de la maquinaria. Por ello, el principal objetivo del diseño y de la secuencia constructiva es minimizar la probabilidad de ocurrencia de rotura. Aunque el grado de seguridad es mayor en grandes operaciones de vertido, un acertado diseño puede minimizar el riesgo y reducir el tiempo de exposición.

Entre las situaciones que son más propensas a fallos repentinos y, por tanto, más susceptibles de generar riesgos, se pueden citar:

- S Vertido descendente (pendiente abajo) sobre terreno escarpado, con pendientes superiores a 25 ° o 30 °.
- S Vertido de materiales con importante cantidad de finos, que influye en la cohesión y resistencia del material de la escombrera, y que puede inducir situaciones con pendientes mayores que el ángulo de reposo de los materiales.
- S Vertidos sobre cimientos de materiales blandos, con resistencia débil a esfuerzos cortantes.
- S El vertido de materiales finos sobre terrenos con surgencias provocan la aparición de superficies freáticas en la escombrera que pueden causar movimientos en el pie del talud y provocar la rotura de la estructura.
- S Vertido rápido que genera una presión intersticial adversa y capacidad portante baja.
- S Cuando existen surgencias en el interior de la escombrera, éstas pueden llegar a desestabilizar la estructura debido a que el material vertido no alcanza un grado óptimo de confinamiento.

Análisis de estabilidad de escombreras

S Combinación de dos o más de las situaciones descritas anteriormente.

Para mejorar la seguridad de las escombreras sobre las personas y equipos, es necesario caracterizar los efectos potencialmente adversos para la salud de los seres humanos y para la integridad de los equipos cuando son expuestos a situaciones de riesgo y peligros ambientales.

6.4.2. Riesgo en instalaciones

Tanto la mina como la planta de tratamiento que se encuentren emplazadas cerca a las escombreras, están expuestas a sufrir daños por posibles roturas de estas estructuras.

Por ello, es necesario realizar una evaluación del riesgo potencial en función del tamaño y forma de la escombrera, las distancias que alcanzarán los materiales en el caso de rotura y la probabilidad de impactar sobre las instalaciones (equipos móviles y fijos, balsas de sedimentación, diques de contención, etc.).

Aparte de un acertado diseño, se puede minimizar el riesgo de rotura de un escombrera si se toman medidas de protección y auscultación, controles operacionales y manteniendo una distancia adecuada entre las escombreras y las instalaciones, así como la construcción de diques y bermas de contención.

6.4.3. Riesgo medioambiental

En la valoración del riesgo potencial sobre el medio ambiente debido a la existencia de una escombrera, se deben considerar todos los escenarios posibles, incluida la evaluación del probable impacto resultante de la rotura de la misma en el caso más desfavorable.

De producirse la rotura, se debe valorar el desplazamiento máximo que alcanzarán los materiales de la escombrera y evaluar el impacto sobre el suelo, sobre los cursos de agua y sobre las instalaciones.

Si se analiza el caso más desfavorable y el impacto sobre el medio ambiente es significativo, se tendrán que realizar estudios muy detallados para cuantificar el riesgo y evaluar con detalle el impacto potencial sobre el medio ambiente, así como desarrollar controles efectivos para atenuar el riesgo hasta niveles aceptables.

Cuando, medioambientalmente, el riesgo es considerado como inaceptable y las medidas de corrección son impracticables por su alto coste o requieren una tecnología muy sofisticada, es necesario descartar esa alternativa y buscar un nuevo emplazamiento para la escombrera.

6.5. TIPOS DE ROTURA DE ESCOMBRERAS

Los fenómenos de inestabilidad más frecuentes observados en escombreras corresponden a los tipos siguientes:

S Deslizamientos superficiales, típicos de escombros sin cohesión. Normalmente, son rápidos y no suelen afectar a grandes volúmenes, salvo que se produzca una alteración sustancial de su geometría, por ejemplo, por socavación.

S Deslizamientos profundos, de tipo aproximadamente circular o mixto, con tramos paralelos a un contorno de base. Suelen tener una evolución en el tiempo condicionada por fenómenos de fluencia, rotura progresiva, etc., y, generalmente, afectan a masas importantes de escombros. Predominan en materiales con rozamiento y cohesión.

Los problemas de estabilidad general pueden venir forzados por el establecimiento de un nivel freático alto en el cuerpo de la escombrera, bien por cubrir surgencias naturales o por embalsarse agua en zonas de vaguada, Fig. 6.1.

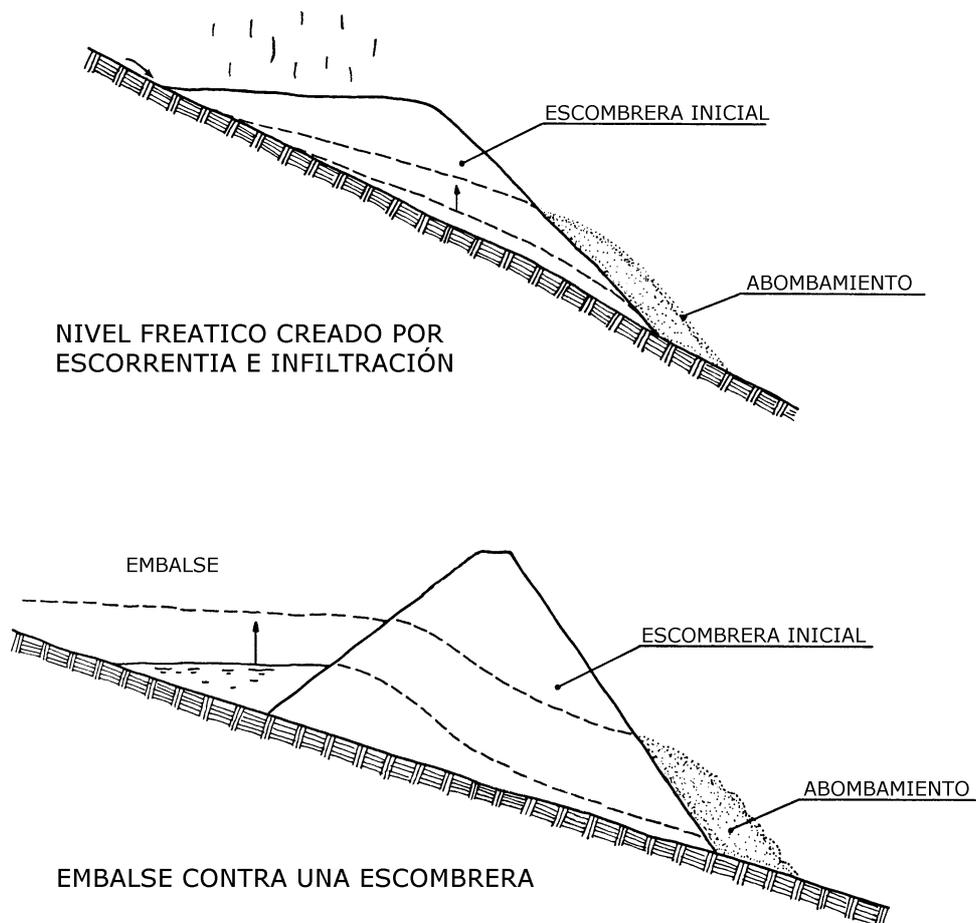


Figura 6.1. Efectos del flujo de agua a través de escombreras (ITGE, 1986).

El movimiento típico es la formación de un abombamiento al pie de los taludes, pudiendo acabar en coladas de detritus ladera abajo si la pendiente de ésta es suficientemente elevada.

Las causas principales de inestabilidad suelen ser, Fig. 6.2:

- S Sobrecarga anormal del borde de la escombrera, por ejemplo, acumulando descargas de dumpers sin proceder a su extendido.
- S Creación de taludes más escarpados de los admisibles por excavación o recorte, erosión superficial, fenómenos de subsidencia, etc.

Análisis de estabilidad de escombreras

- S Eliminación del soporte natural al pie de la escombrera, por ejemplo, por socavación fluvial, apertura de zanjas en el terreno de cimentación, etc.
- S Creación de presiones intersticiales por ascenso del nivel freático al no existir sistema de drenaje o quedar inutilizado y, más frecuentemente, al ocluir cursos estacionales o surgencias.
- S Erosión interna como consecuencia de la filtración generada por las causas anteriores.
- S Inundación del pie de escombreras situadas próximas a cauces fluviales.
- S Fenómenos dinámicos como voladuras, hincas de pilotes, impactos de vertido, etc.

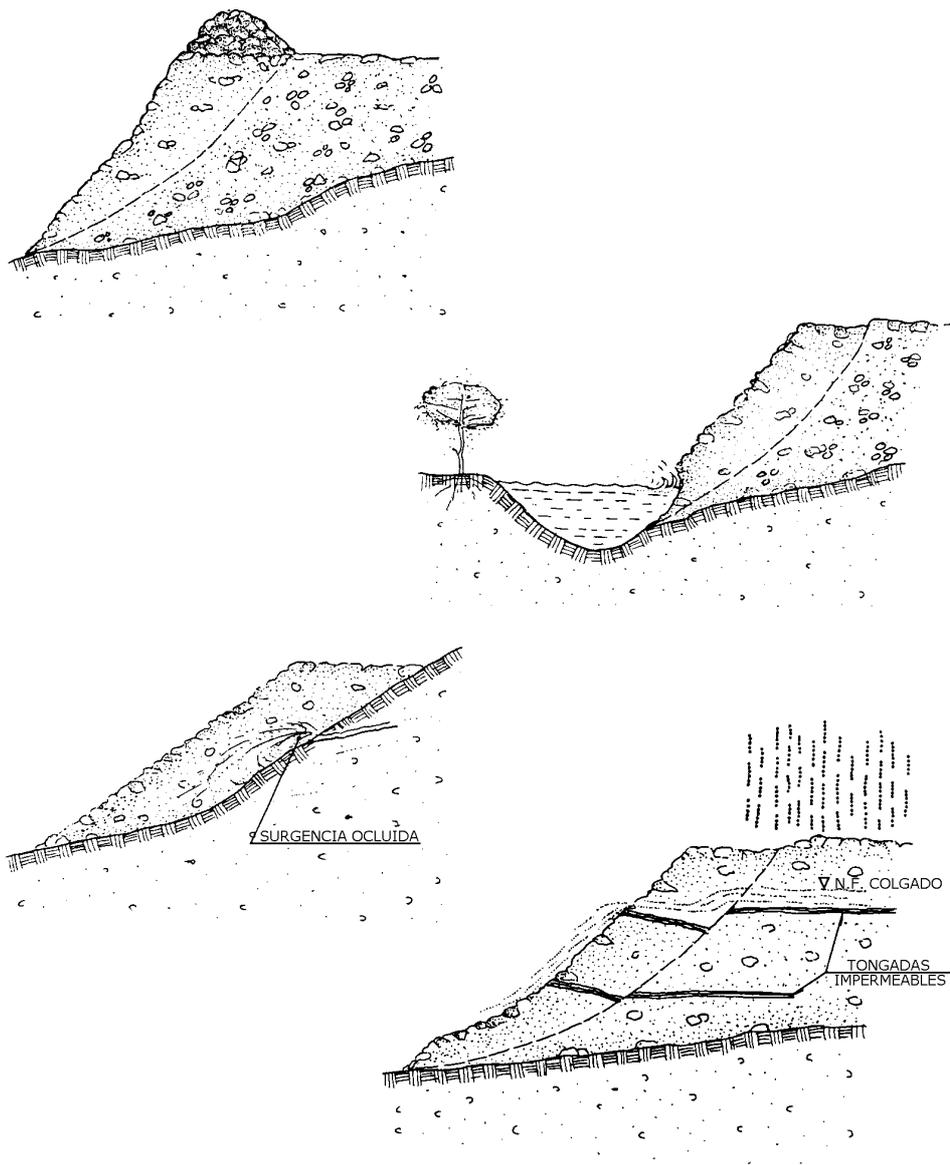


Figura 6.2. Causas de inestabilidad de escombreras (ITGE, 1986).

Para seleccionar una apropiada técnica de análisis de estabilidad en escombreras así como para elaborar el programa de control, es necesario conocer la teoría básica sobre deformación y rotura de estas estructuras. En la Tabla 6.5 se muestran varios tipos de roturas de escombreras.

TABLA 6.5. Tipos de rotura de escombreras.

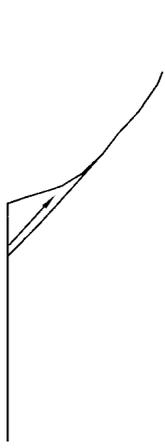
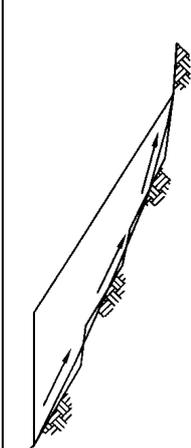
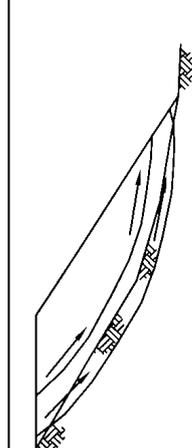
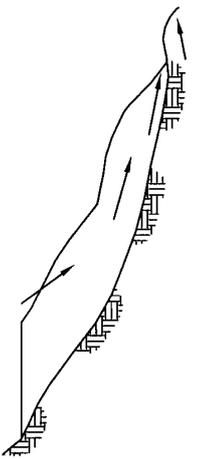
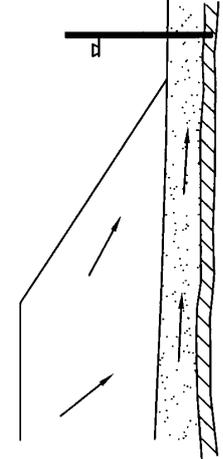
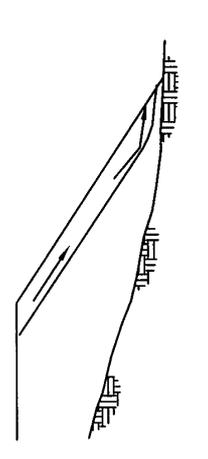
TIPO DE ROTURA	ESQUEMA	CAUSAS PROBABLES	EFFECTOS	SIGNOS DE PELIGRO
ROTURA DE BORDE		CRESTA CON PENDIENTE EXCESIVA DEBIDO AL ALTO CONTENIDO DE FINOS, RITMO RÁPIDO DE VERTIDO, MATERIAL HÚMEDO	ROTURAS DE CRESTA A PEQUEÑA ESCALA, HUNDIMIENTO DE LA CRESTA DE VERTIDO	AGRIETAMIENTO DE LA CRESTA, HUNDIMIENTOS CERCA DE LA CRESTA, TALUD PENDIENTE BAJO LA CRESTA, AUMENTO EN EL GRADIENTE DE DESPLAZAMIENTOS DE LA CRESTA
ROTURA DEL CIMIENTO		MATERIAL FLOJO EN EL CIMIENTO, RITMO DE DESCARGA RÁPIDO, ALTA PRESIÓN DE PORO EN EL CIMIENTO, EFECTOS DE LOS TERREMOTOS O VOLADURAS	PUEDEN CAUSAR GRANDES ROTURAS AFECTANDO A PARTES IMPORTANTES DE LA ESCOMBRERA	FILTRACIONES EN EL PIE, ABOMBAMIENTO O DEFORMACIÓN EXTENSA DEL PIE DE LA ESCOMBRERA, GRIETAS POR DETRÁS DE LA CRESTA DE LA ESCOMBRERA
ROTURA GLOBAL		MATERIAL FLOJO A LO LARGO DE TODA LA BASE DE LA ESCOMBRERA (e.g. CAPA DE SUELO), DRENAJE DEFICIENTE EN LA BASE DE APOYO, CIMIENTO MUY PENDIENTE, RITMO DE VERTIDO ALTO	LA ROTURA DE LA ESCOMBRERA POR LA BASE AFECTA A TODO EL CONJUNTO DE LA ESCOMBRERA	GRIETAS EN LA PLATAFORMA DE LA ESCOMBRERA EN LA PROXIMIDADES DEL CONTACTO CON EL TERRENO, HUNDIMIENTO GENERAL DE TODA LA PLATAFORMA
ROTURAS ROTACIONAL		MATERIAL FLOJO EN LA ESCOMBRERA O CIMIENTO, ALTAS PRESIONES DE PORO, RÁPIDOS RITMOS DE DESCARGA PUEDEN AFECTAR SOLO AL MATERIAL VERTIDO O INCLUIR AL CIMIENTO. PUEDEN TENER CONFIGURACIÓN CIRCULAR O NO CIRCULAR	PUEDEN CAUSAR ROTURAS QUE AFECTEN A UNA GRAN PARTE DE LA ESCOMBRERA. PUEDEN AFECTAR SOLO AL MATERIAL VERTIDO O INCLUIR AL CIMIENTO (SE MUESTRAN DOS TIPOS DE ROTURA TÍPICAS)	ABOMBAMIENTO EN EL PIE, AGRIETAMIENTO Y HUNDIMIENTO POR DETRÁS DE LA CRESTA, RUIDO DE ROCAS, POSIBLES ESCARPES POR DETRÁS DE LA CRESTA

TABLA 6.5. Tipos de rotura de escombreras (continuación).

TIPO DE ROTURA	ESQUEMA	CAUSAS PROBABLES	EFECTOS	SIGNOS DE PELIGRO
<p>ROTURA DE PIE</p>		<p>MATERIALES DEL CIMIENTO DÉBILES EN EL PIE, ALTAS PRESIONES DE PORO, EN EL PIE, TALUDES ESCARPADOS EN EL PIE, RITMOS DE VERTIDO ALTOS</p>	<p>PERDIDA DE CAPACIDAD PORTANTE EN EL PIE, PUDIENDO PERMITIR LA PROPAGACIÓN DE LA ROTURA DEL TALUD</p>	<p>DEFORMACIÓN AMPLIA DEL PIE, DESPLAZAMIENTO Y ABOMBAMIENTO DEL TERRENO DEL CIMIENTO Y/O MATERIAL VERTIDO EN EL PIE</p>
<p>LICUEFACCIÓN DEL CIMIENTO</p>		<p>MATERIALES LIMOSOS A ARENOSOS EN EL CIMIENTO, POSIBLEMENTE CONFINADOS POR ACUTARADOS, PRESIONES DE PORO DEBIDAS AL RÁPIDO RITMO DE DESCARGA. FUERZAS SISMICAS MUY IMPORTANTES</p>	<p>POSIBLE ROTURA A GRAN ESCALA CON DISTANCIAS DE CORRIMIENTO IMPORTANTES. PUEDE TENER LUGAR EN ESCOMBRERAS CON CIMIENTO DE PENDIENTE SUAVE</p>	<p>PRESIONES PIEZOMÉTRICAS EN EL CIMIENTO ELEVADOS. EN ALGUNOS CASOS, PUEDEN APARECER EBULLICIONES DE ARENA ANTES DE LA ROTURA</p>
<p>ROTURA PLANAR</p>		<p>PLANO DE DEBILIDAD EN EL MATERIAL VERTIDO, APROXIMADAMENTE PARALELO AL FRENTE DE VERTIDO, DEBIDO A LA MALA CALIDAD DEL MATERIAL, CAPAS DE NIEVE O RÁPIDA CARGA</p>	<p>PUEDE AFECTAR A UN GRAN VOLUMEN DE LA ESCOMBRERA CON GRANDES DISTANCIAS DE CORRIMIENTO</p>	<p>DEPRESIÓN DE LA CRESTA DE LA ESCOMBRERA, ABOMBAMIENTO DEL PIE, GRIETAS EN LA PLATAFORMA POR DETRÁS DE LA CRESTA</p>

6.5.1. Rotura de borde

También conocida como rotura de cresta, este tipo de rotura se produce, generalmente, en escombreras con crestas de fuertes pendientes, con alto contenido de materiales finos y cohesivos, y cuando el ritmo de vertido ha sido rápido. En algunos casos ocurre en zonas de fuertes precipitaciones, donde se genera una importante presión intersticial en el material fino, así como la pérdida de la cohesión aparente.

La rotura de borde también puede ocurrir cuando el material de la escombrera es deleznable y crea una baja permeabilidad cuando es vertido por tongadas, permitiendo desarrollar una presión intersticial alta. Las altas precipitaciones y las fuertes pendientes también pueden iniciar la rotura de escombreras con materiales gruesos.

Por lo general, la rotura de borde ocurre debajo del área de la cresta, sin embargo, el cuerpo de la escombrera y el cimientado no se ven afectados.

Es más probable que se produzca la rotura de borde en escombreras construidas mediante vertido directo a grandes alturas y rápido crecimiento de la cresta, o cuando el material vertido contiene gran cantidad de finos y es degradable.

6.5.2. Rotura planar

La rotura planar consiste en el desplazamiento del material vertido a lo largo de un plano de debilidad situado en el interior de la escombrera. Si el plano de debilidad no corta el talud de la escombrera, la rotura se produce en el pie. Este plano de debilidad se crea durante la fase de construcción de la escombrera debido a la mala calidad del material o la presencia de gran cantidad de finos que forman una capa aproximadamente paralela al frente de vertido.

La alta presión intersticial en el interior de la escombrera también puede contribuir a la formación de la rotura planar y, si el plano de debilidad es paralelo a la superficie de vertido, la rotura es muy similar a la del caso de rotura de borde, excepto cuando la superficie de rotura es generada por un hundimiento interno de la escombrera y la rotura resultante es sustancialmente más pronunciada.

6.5.3. Rotura rotacional

Consiste en el movimiento del material vertido en la escombrera o el cimientado a lo largo de una superficie de rotura en forma circular o curvilínea, que puede estar provocada por rápidos ritmos de descarga y vertido de material débil o fino en la escombrera. Este tipo de rotura también puede iniciarse por las altas presiones intersticiales debido a la presencia de agua en el interior de la escombrera.

6.5.4. Rotura en flujo

Este tipo de rotura puede estar provocada por el deslizamiento de materiales saturados y derrumbamiento o colapso del talud de la escombrera. Generalmente, son roturas de poca profundidad acompañadas de la fluidificación del material saturado, o parcialmente saturado, en la cresta o en el frente de la escombrera.

Análisis de estabilidad de escombreras

La saturación de los materiales de la escombrera, por lo general, se debe a las altas precipitaciones y la infiltración superficial, así como a las surgencias de agua en el interior de la escombrera.

El volumen y la velocidad del flujo del material puede incrementarse pendiente abajo y, debido a la erosión de la base, la fuerza del flujo irá aumentando.

El riesgo de rotura por flujo sera mayor cuando se trata de materiales de poca densidad, de rellenos flojos o compuesto por materiales finos.

6.6. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Para comprender el comportamiento de una escombrera, es fundamental un conocimiento adecuado de las condiciones del cimiento y de las propiedades del material. Basándose en estos conocimientos, se podrán estudiar diferentes alternativas para la configuración de la escombrera y una evaluación inicial del tipo de inestabilidad de la misma. Los tipo de inestabilidad más críticos serán objeto de un estudio más detallado. Por lo tanto, los criterios de diseño se desarrollan tomando los resultados de los análisis de estabilidad como base.

El paso más importante en la etapa de análisis es la determinación del tipo de rotura crítica. En muchos casos, este tipo de rotura puede ser fácilmente hallada basándose en la configuración de la escombrera o en las propiedades del material. Sin embargo, cuando estos factores son más complejos, se debe realizar un análisis preliminar de los posibles tipos de rotura, fase donde los métodos gráficos son muy aconsejables debido a su rapidez.

Una vez que el tipo de rotura ha sido claramente definido, se llevará a cabo un análisis detallado utilizando cualquier técnica posteriormente detallada. En la mayoría de los casos, los resultados dados por los diferentes métodos son comparables, por lo que para cada caso existen varios métodos aplicables. En casos muy complejos, se recomienda una comparación de varios métodos para obtener unos resultados más fiables.

Cuando las condiciones de la cimentación y las propiedades de los materiales sean complejas y no estén bien definidas, se puede complicar la obtención fiable del mecanismo de rotura. Además, ciertos tipos de rotura se comprenden mejor que otros, algunas técnicas de análisis son muy complejas, y puede que no modelicen correctamente el caso en estudio. En estos casos, es conveniente realizar un diseño más conservador, con altos factores de seguridad y una geometría más conservadora.

Existe una gran variedad de métodos para el estudio de la estabilidad de taludes, aunque, en principio, se pueden dividir en dos grandes grupos:

- S Métodos de cálculo en deformaciones: tienen en cuenta las deformaciones del terreno, así como las leyes de la estática.
- S Métodos de equilibrio límite: se basan exclusivamente en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable.

Estos últimos se suelen dividir en métodos exactos y no exactos, dependiendo de la naturaleza de sus resultados. En la mayoría de los casos prácticos no aparece una solución exacta debido a la geometría de

la superficie de rotura, y se deberá recurrir a simplificaciones o hipótesis previas. Además, un cálculo riguroso exigiría considerar la anisotropía de los escombros, las variaciones de resistencia con los niveles de tensiones en cada punto de la eventual superficie de deslizamiento, efectos de forma, etc. Por lo tanto, no está justificado tal refinamiento dado el tipo de estructura y la gran incertidumbre respecto a la naturaleza de los estériles y sus variaciones a lo largo de la vida de la estructura.

En general, los métodos de análisis también se pueden dividir en aquellos que tienen en cuenta las tensiones totales, donde no se considera la presión intersticial, por lo que serán aplicables a casos donde ésta sea desconocida o cuando el estudio se vaya a realizar a corto plazo, y los que tienen en cuenta las tensiones efectivas, que se considera el método más versátil y adecuado, aplicable a estudios a largo plazo donde las condiciones intersticiales sean conocidas.

Los métodos de equilibrio límite no exactos, a su vez, se subdividen en métodos que consideran el equilibrio global del terreno, y en métodos de fajas (rebanadas), que consisten en la división de la masa deslizante en fajas verticales en donde se realiza un estudio de estabilidad individual, y que representa el método más utilizado.

En particular, los métodos de fajas se pueden dividir en dos grupos:

S Métodos aproximados: en estos casos no se cumplen todas las ecuaciones de la estática. En este apartado se incluirán los métodos de Fellenius, Janbu y Bishop modificado.

S Métodos precisos: estos métodos cumplen todas las ecuaciones de la estática. Los métodos de Morgenstern-Price, Spencer y Bishop completo pertenecen a este grupo.

Además, existen otros métodos de análisis como es el método de elementos finitos, el cálculo dinámico y el modelo tridimensional.

Se puede decir que los cálculos de estabilidad finalizan siempre con la determinación del Factor de Seguridad. Si el valor obtenido está por debajo del exigido se procede a rediseñar geoméricamente la escombrera o a mejorar las condiciones de drenaje. En la Tabla 6.6 se indican los Factores de Seguridad mínimos para los diferentes escenarios posibles.

6.6.1. Análisis de estabilidad de roturas circulares mediante gráficos

La utilización de superficies de rotura circulares es la hipótesis general más cómoda y la más extendida, ya que la utilización de diversos tipos de gráficos proporciona un conocimiento rápido y barato del factor de seguridad sin necesidad de realizar otros análisis complementarios. Por lo tanto, para casos simples su estudio puede ser suficiente para definir el diseño de la escombrera, mientras que en casos más complejos, los gráficos se utilizan para obtener estimaciones previas.

Todos los gráficos aplicables a la estabilidad de taludes realizan una serie de simplificaciones con relación al talud y a las propiedades del material:

S Se consideran taludes simples formados por un plano inclinado que interseca con los planos horizontales en sus dos extremos.

Análisis de estabilidad de escombreras

S La superficie de rotura tendrá una forma circular.

TABLA 6.6. Coeficientes de seguridad mínimos requeridos en el proyecto de escombreras.

CASO I: Implantaciones sin riesgo para personas, instalaciones o servicios.			
H < 15 m o V < 25 000 m ³ , o H > 15 m en escombreras en manto Pueden constituirse con el ángulo de vertido de los escombros (F _S 1)			
	F ₂	F ₁	
15 < H < 30 m	1,20	1,10	
H > 30 m	1,30	1,20	
CASO II: Implantaciones con riesgo moderado			
	F ₃	F ₂	F ₁
H < 15 m o V < 25 000 m ³ , o H > 15 m en escombreras en manto	1,20	1,15	1,00
15 < H < 30 m	1,35	1,25	1,10
H > 30 m	1,45	1,30	1,15
CASO III: Implantaciones con riesgo elevado.			
Se proscriben las escombreras en manto sin elementos de contención o desviación al pie.			
	F ₃	F ₂	F ₁
H < 20 m	1,40	1,20	1,10
H > 20 m	1,60	1,40	1,20
NOTAS:			
S Esta tabla corresponde a escombreras de la minería de carbón, realizadas de acuerdo con estas recomendaciones, relativamente homogéneas y en las que los finos cohesivos o de lavadero no influyen de manera apreciable en la estabilidad.			
S Los coeficientes de seguridad corresponden a las situaciones siguientes:			
F ₁ : Escombreras normales, sin efectos de aguas freáticas y en cuya estabilidad no influye el cemento.			
F ₂ : Escombreras sometidas a filtración, agua en grietas o fisuras, y riesgo de deslizamiento por la cimentación.			
F ₃ : Situaciones excepcionales de inundación, riesgo sísmico, etc.			
S Los valores de F indicados son para escombreras exentas o en ladera con inclinación de hasta el 8 %. En el caso de vaguadas encajadas (ancho máximo \leq altura) puede admitirse una reducción del 10 %, llegando al 3 % para vaguadas con ancho máximo \leq 2,5 veces la altura.			
En laderas de inclinación superior al 8 % los coeficientes de F se incrementan en los valores siguientes:			
CASO I: $F = 0,10$			
CASO II: $F = (0,03(\alpha - 0,08))^{1/2}$			
CASO III: $F = (0,07(\alpha - 0,08))^{1/2}$			
siendo α la inclinación de la ladera en tanto por 1, con $\alpha < B$			
S Se supone que los parámetros geotécnicos se han determinado mediante ensayos. En el caso de estimación, éstas deben justificarse, mayorando los coeficientes de la tabla en un 10-15 %, según la fiabilidad de las estimaciones.			

Fuente: Manual para el Diseño y Construcción de Escombreras y Presas de Residuos Mineros (ITGE, 1986).

- S La resistencia del suelo será isotrópica y homogénea en cualquier punto.
- S La tensión tangencial vendrá dada por la expresión siguiente:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi$$

donde:

- τ = Tensión tangencial.
- c = Cohesión.
- σ = Tensión normal.
- ϕ = Ángulo de rozamiento interno.

- S El talud se extiende durante una cierta profundidad, calculada en función de la altura del talud (H), hasta una capa de gran resistencia donde la rotura no puede aparecer.

Sobre la porción de talud así definido actuarán las siguientes fuerzas, Fig. 6.3:

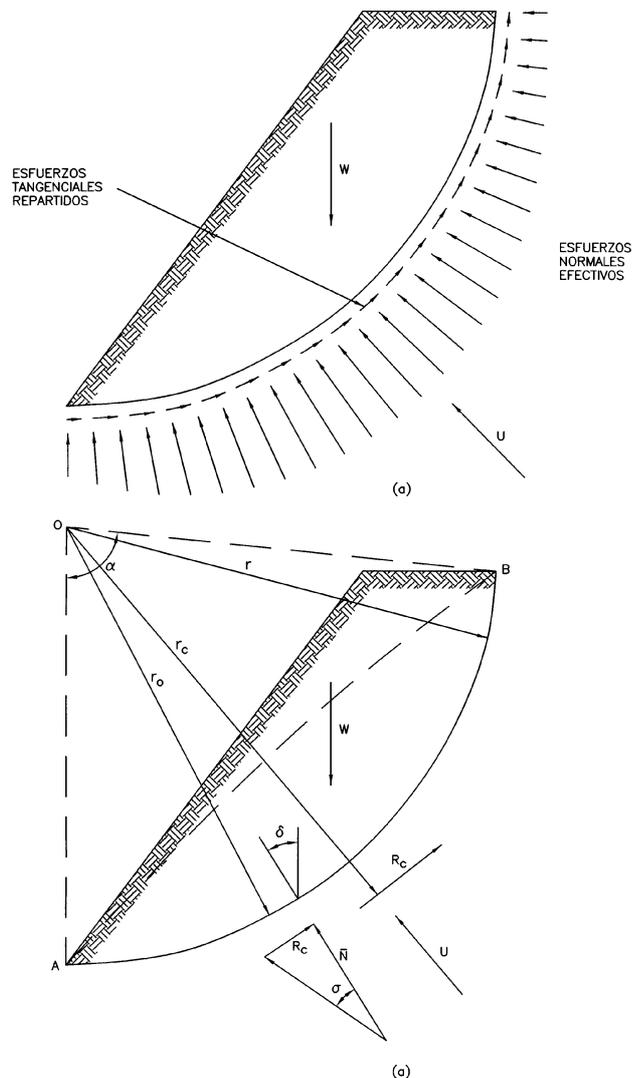


Figura 6.3. Fuerzas que actúan sobre una cuña deslizante de base circular: a) Esfuerzos normales y tangenciales sobre el contorno. B) Fuerzas resultantes (CEDEX, 1995).

Análisis de estabilidad de escombreras

- S La acción del peso propio o gravedad, W .
- S La presión intersticial del agua, distribuida a lo largo de la superficie de rotura, U .
- S El esfuerzo tangencial distribuido sobre la superficie de rotura, T .
- S El esfuerzo normal distribuido sobre dicha superficie, N .

Con estos datos y con la definición clásica del coeficiente de seguridad considerando el criterio de rotura de Mohr-Coulomb, se puede realizar un diagrama gráfico de tensiones con el que se puede determinar la estabilidad del talud.

Al final de este capítulo, se presenta un cuadro comparativo, Tabla 6.7, de los métodos de resolución por medio de gráficos descritos a continuación.

6.6.1.1. Gráficos de Taylor

Taylor realizó uno de los primeros gráficos utilizados para la estabilidad de terrenos que, aún hoy en día, son ampliamente utilizados. Dichos gráficos están basados en el método del equilibrio límite de un círculo de rozamiento. El inconveniente más importante es la incompatibilidad de su uso en taludes en terrenos no cohesivos.

En los gráficos se utilizan tensiones totales, por lo que la presión intersticial no se tendrá en cuenta.

Existen diferentes gráficos de Taylor, de modo que se distinguen las condiciones en el que el ángulo de rozamiento interno, B , sea nulo, cuando existen materiales con valores de cohesión, c , y ángulo de rozamiento interno distinto de cero, además de gráficos para localizar el centro de los círculos de rotura.

En el caso de suelos con un ángulo de rozamiento interno nulo, se utilizará el gráfico de la Fig. 6.4.

Para utilizar dicho gráfico, se debe partir de los datos geométricos iniciales del problema, que serán el ángulo del talud con la horizontal, β , y la altura, d , definida como aparece en el esquema de dicha Fig. 6.4, para hallar el número de estabilidad, N_0 , correspondiente. A continuación se determinará el parámetro P_d definido por la siguiente expresión:

$$P_d \text{ fi } \frac{H + q / \gamma_w \cdot H_w}{\mu_q \cdot \mu_w \cdot \mu_t}$$

donde:

- H = Altura del talud.
- q = Sobrecarga uniforme en la cabeza del talud.
- γ_w = Densidad húmeda del material.
- H_w = Profundidad del nivel freático medida sobre el pie del talud.
- μ_q = Factor de corrección de carga.
- μ_w = Factor de corrección de presión intersticial.
- μ_t = Factor de corrección por grietas de tracción.

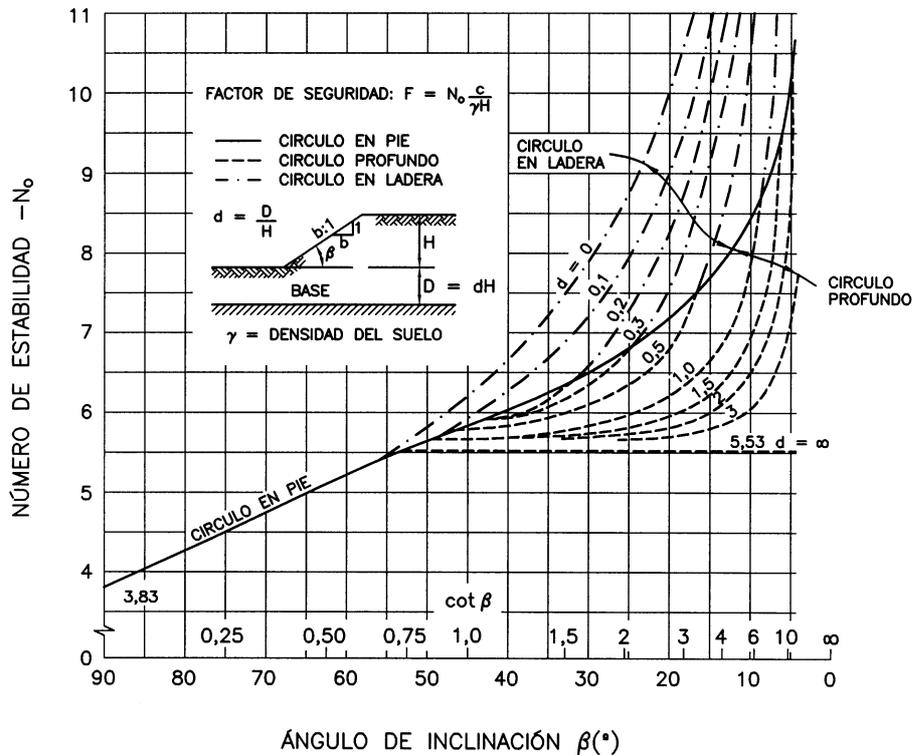


Figura 6.4. Gráfico de estabilidad de taludes para suelos con $\phi=0$ (Janbu, 1968).

Los valores de los factores de corrección están tabulados en las Figs. 6.5 y 6.6, elaboradas por Janbu (1968).

Una vez hallado P_d , se estará en condiciones de aplicar la siguiente expresión para hallar el coeficiente de seguridad:

$$F \text{ fi } \frac{N_0 \cdot c}{P_d}$$

donde:

c = Cohesión real del suelo.

En suelos homogéneos con rozamiento y cohesión será válido el gráfico de la Fig. 6.7.

En los casos en los que el ángulo de rozamiento interno sea mayor que cero y se quiera estudiar la influencia de la sobrecarga, grietas de tracción, etc., se utilizará el gráfico de la Fig. 6.8 siguiendo el siguiente procedimiento. En primer lugar, se halla el valor del parámetro P_d utilizando la misma expresión que en el caso anterior y obteniendo igualmente, en caso de ser necesario, los factores de corrección adecuados. A continuación se obtendrá el parámetro P_e mediante la siguiente fórmula:

$$P_e \text{ fi } \frac{H + q / f|_w \cdot H'_w}{\mu_q \cdot \mu'_w}$$

Análisis de estabilidad de escombreras

donde:

H'_w = Altura del agua en el interior del talud.

μ'_w = Coeficiente corrector correspondiente.

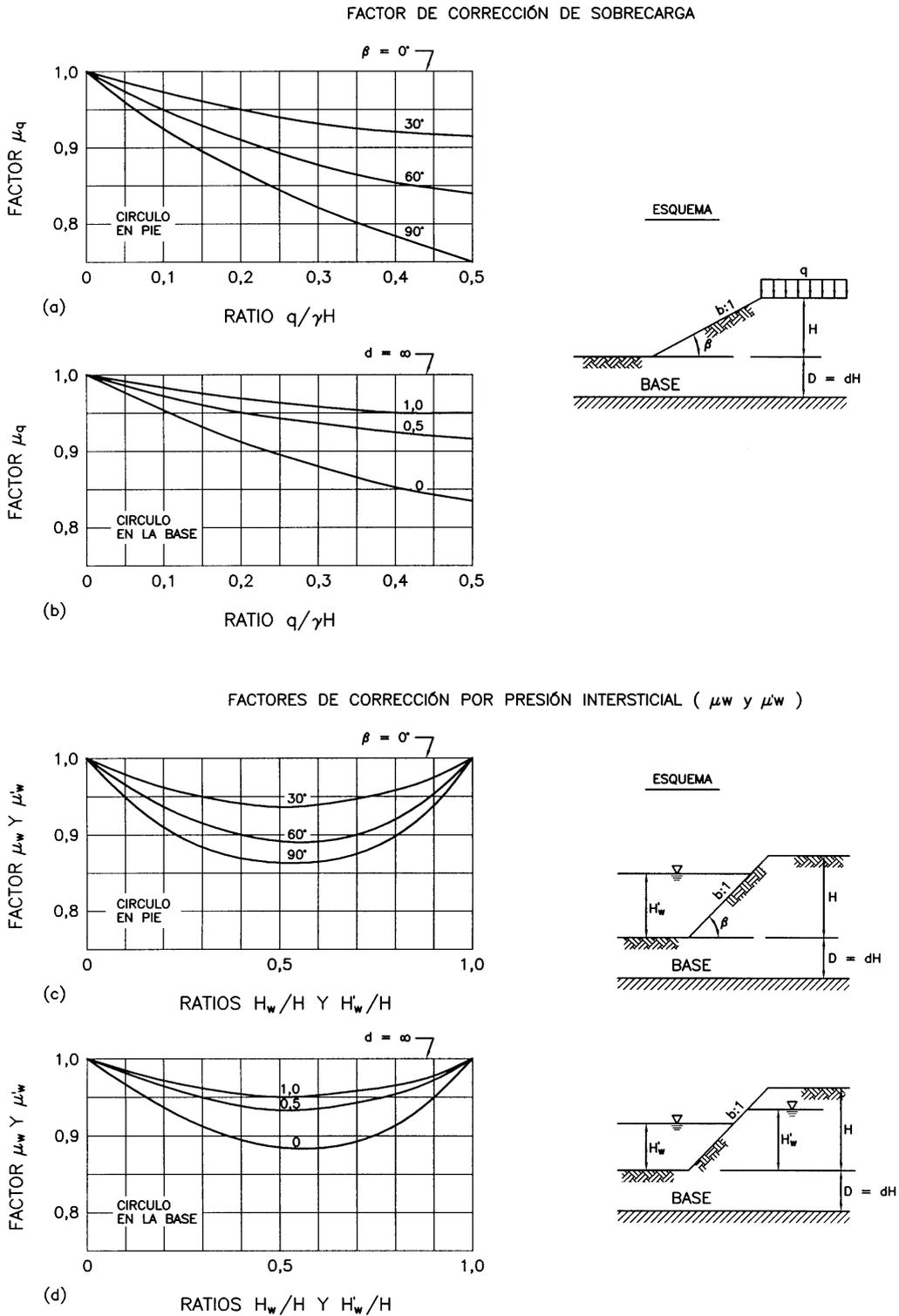


Figura 6.5. Factores de corrección por sobrecarga y presión intersticial para $B \sim 0$ (Janbu, 1968).

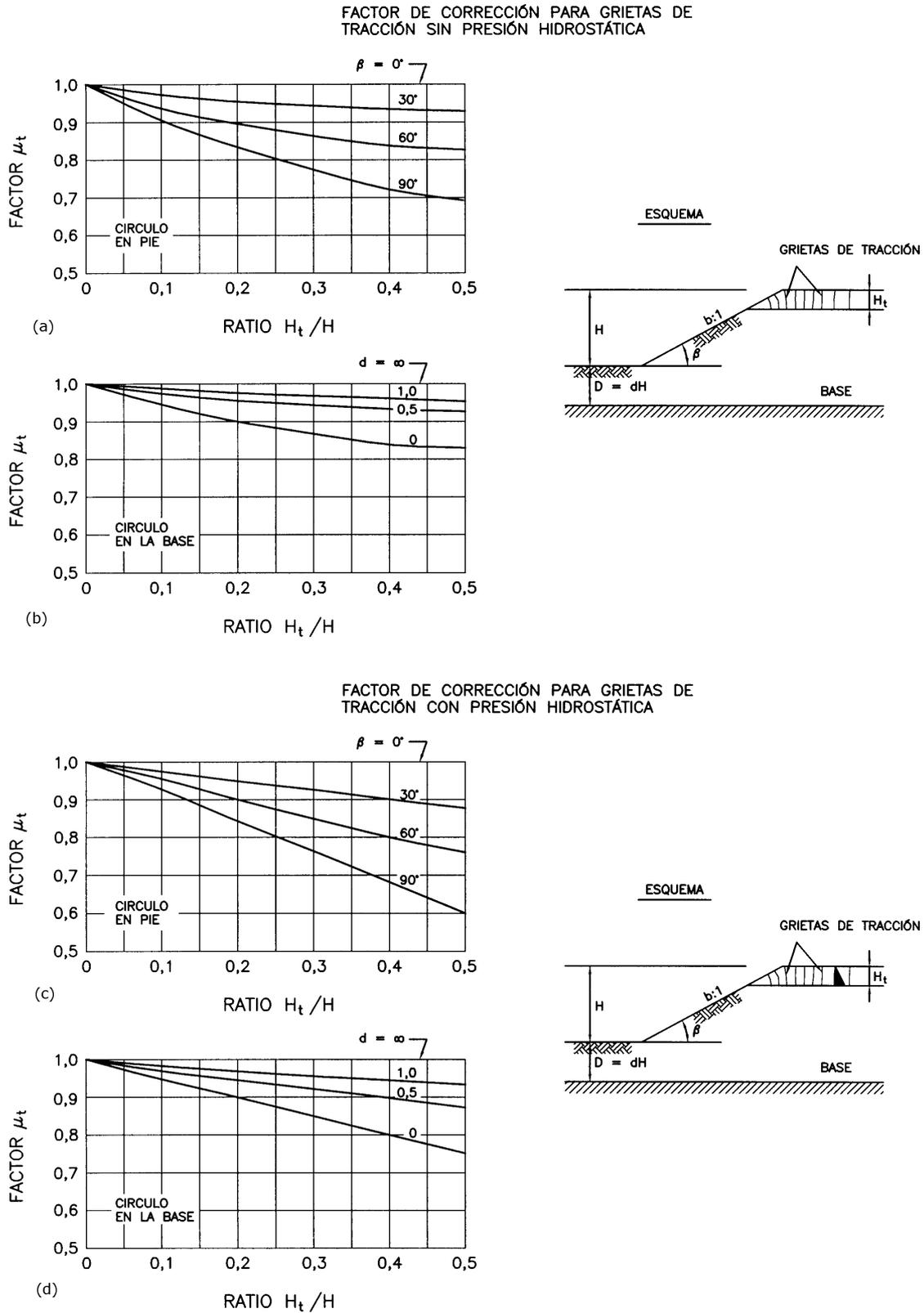


Figura 6.6. Factor de corrección para grietas de tracción para $B \sim 0$ (Janbu, 1968).

Análisis de estabilidad de escombreras

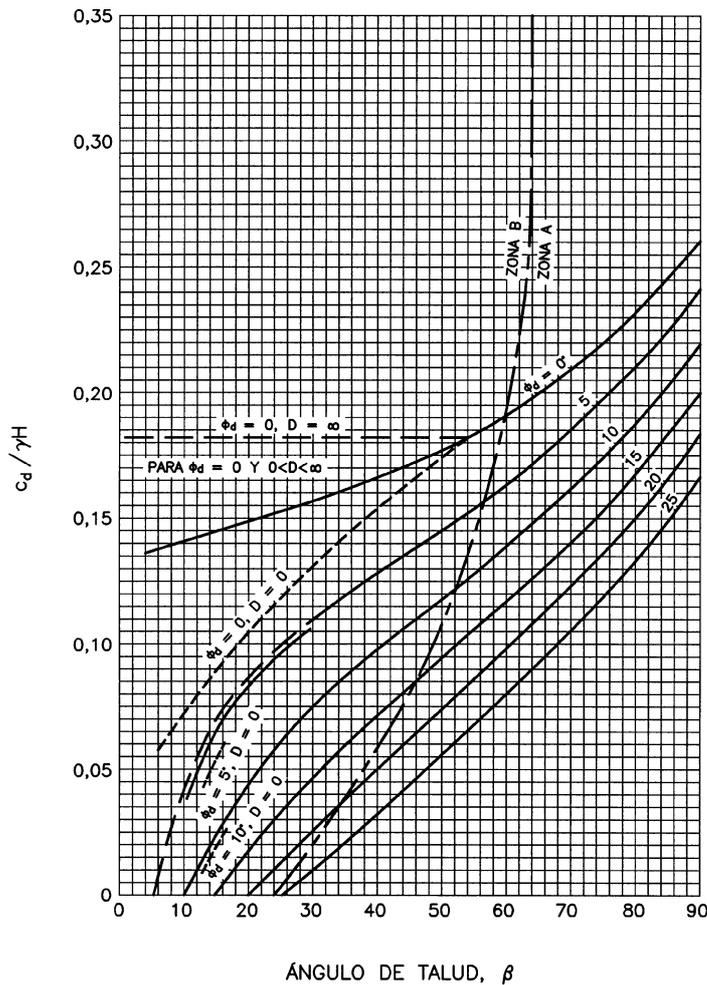


Figura 6.7. Estabilidad de taludes homogéneos en terrenos con rozamiento interno (Taylor, 1961).

El valor de H'_w se puede hallar a partir de la Fig. 6.9, utilizando el valor de H_c que es la altura del agua bajo la cresta del talud, mientras que el valor de μ'_w se halla en el gráfico situado en la parte inferior de la Fig. 6.5. En este momento, se podrá hallar el valor del parámetro i_{cB} de la siguiente forma:

$$i_{cB} \text{ fi } \frac{P_e \cdot \text{tg } B}{c}$$

donde c y B son los valores medios que se alcanzan a lo largo de la superficie de deslizamiento.

Entrando en el gráfico de la Fig. 6.8 se podrá calcular el número de estabilidad N_{cf} en función de β y de i_{cB} .

El coeficiente de seguridad se calculará con:

$$F \text{ fi } N_{cf} \cdot \frac{c}{P_d}$$

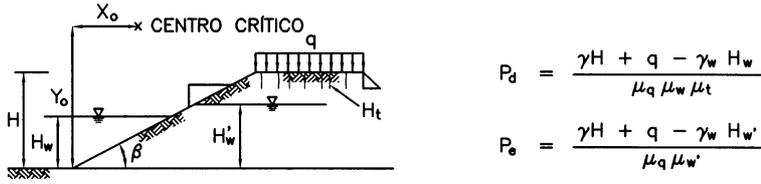
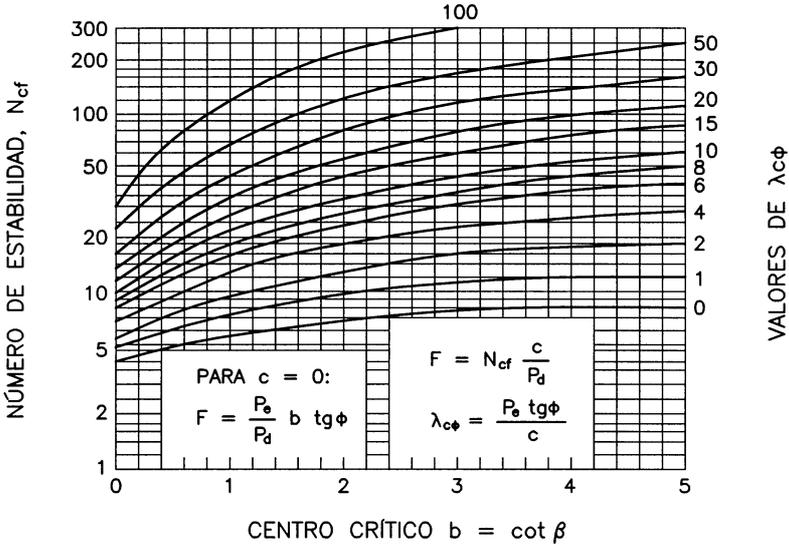


Figura 6.8. Gráficos de estabilidad para $B > 0$ (Janbu, 1968).

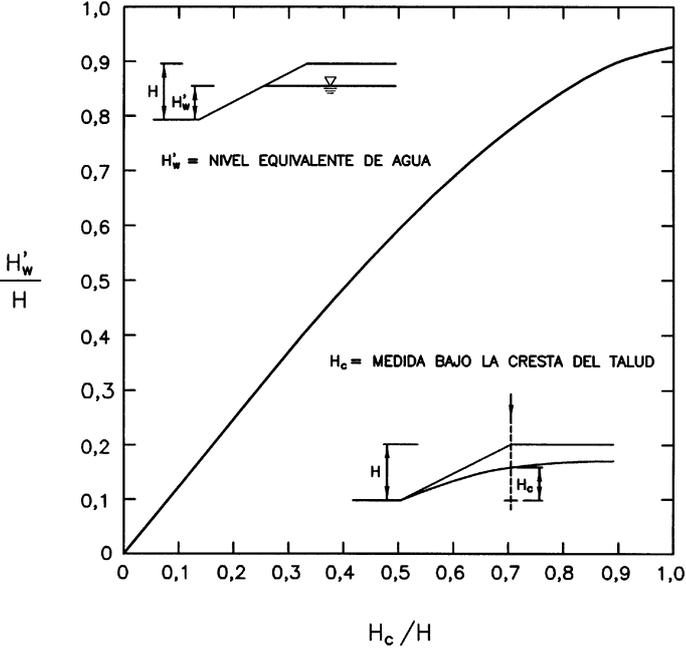


Figura 6.9. Gráfico para determinar las condiciones de filtración. (Duncan, 1987).

6.6.1.2. Gráficos de Bishop y Morgenstern

Los gráficos desarrollados por Bishop y Morgenstern (1960) están basados en el método de Bishop simplificado. La aplicación de estos gráficos está dirigida a taludes homogéneos con un ángulo de inclinación comprendido entre 11 ° y 27 °, por lo que existirán una gran cantidad de casos en los que la aplicación de este método no sea viable. Por otro lado, los valores de los parámetros a utilizar en cada caso, tales como la cohesión, c , la densidad húmeda, γ_w , o la altura del talud, H , pueden variar libremente, excepto en el caso del ángulo de rozamiento interno, B , cuyo valor debe estar comprendido entre 10 ° y 40 °.

Para hallar el coeficiente de seguridad, F , se puede aplicar la siguiente expresión:

$$F = \frac{m}{n} \cdot r_u$$

donde:

m, n = Coeficientes de estabilidad determinados a partir de los gráficos.

r_u = Coeficiente de presión intersticial.

Los gráficos utilizados dependen de la profundidad anteriormente definida como D , teniendo los valores de 0 y 0,25 en los gráficos de la Fig. 6.10.

Para la utilización de los mismos, también se debe hallar el valor del número de estabilidad, N_f , por medio de la expresión siguiente:

$$N_f = \frac{c}{\gamma_w \cdot H}$$

Los valores de N_f en los gráficos son de 0 y 0,025.

Dado un caso cualquiera en el que se puede hallar N_f y donde es conocido el ángulo de rozamiento interno, se puede entrar en el gráfico adjunto hallando una presión de poros r_{ue} . En caso de que esta presión sea menor que la presión de poros dada, se deberá ir a un gráfico con una profundidad D mayor (más crítica), donde se podrán saber los valores de m y n , necesarios para conocer el factor de seguridad F .

Si al hallar N_f no se obtiene un valor exacto de 0 ó 0,025 se podrá realizar una interpolación de gráficos, siendo éste uno de los principales inconvenientes de este método.

Sin embargo, una ventaja de este método es la sencilla observación en la variación del factor de seguridad ante variaciones en la presión intersticial o de otros parámetros como el ángulo de rozamiento interno o el ángulo del talud.

6.6.1.3. Gráficos de Spencer

En el proceso de desarrollo de los métodos de equilibrio límite, Spencer (1967) elaboró una serie de gráficos para predecir el factor de seguridad en taludes homogéneos.

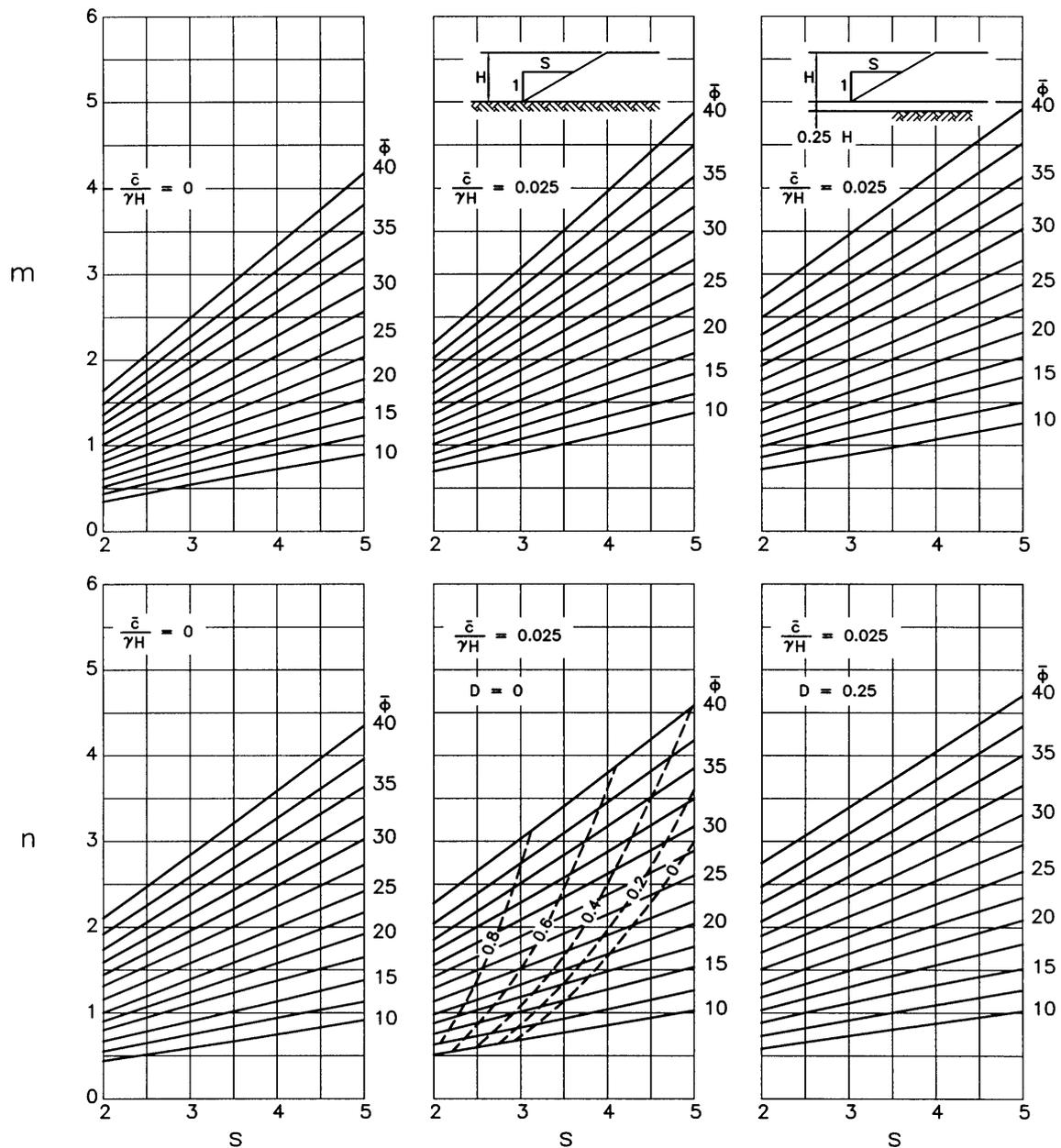


Figura 6.10. Gráficos de estabilidad (Bishop y Morgenstern, 1960).

En dicho método, se parte de la hipótesis de que las fuerzas de deslizamiento son todas paralelas, y se fundamenta en el equilibrio de fuerzas y de momentos, diferenciándose así del método de Bishop simplificado. Además, Spencer considera que el talud consiste en un material homogéneo que se extiende hasta una gran profundidad, por lo que no interfiere en otras superficies de rotura.

En la aplicación de los gráficos de Spencer se debe definir el número de estabilidad N como:

$$N \text{ fi } \frac{c}{F \cdot f|_w \cdot H}$$

Análisis de estabilidad de escombreras

En la práctica, este método se utiliza para hallar el ángulo de inclinación del talud a partir de un factor de seguridad dado. En este caso, se entraría en el gráfico de la Fig. 6.11 con el valor de N obtenido y con los valores del ángulo de rozamiento interno, B , y de la presión de poros, r_u , para obtener el valor del ángulo β . En dicha operación, se debe hallar el valor de B_d necesario para entrar en los gráficos, que se define por:

$$B_d \text{ fi } tg^{-1} \left(\frac{tg B}{F} \right)$$

También es de fácil aplicación en los casos en los que el ángulo de rozamiento interno es dato y se desea hallar un factor de seguridad, mediante la aplicación de aproximaciones sucesivas.

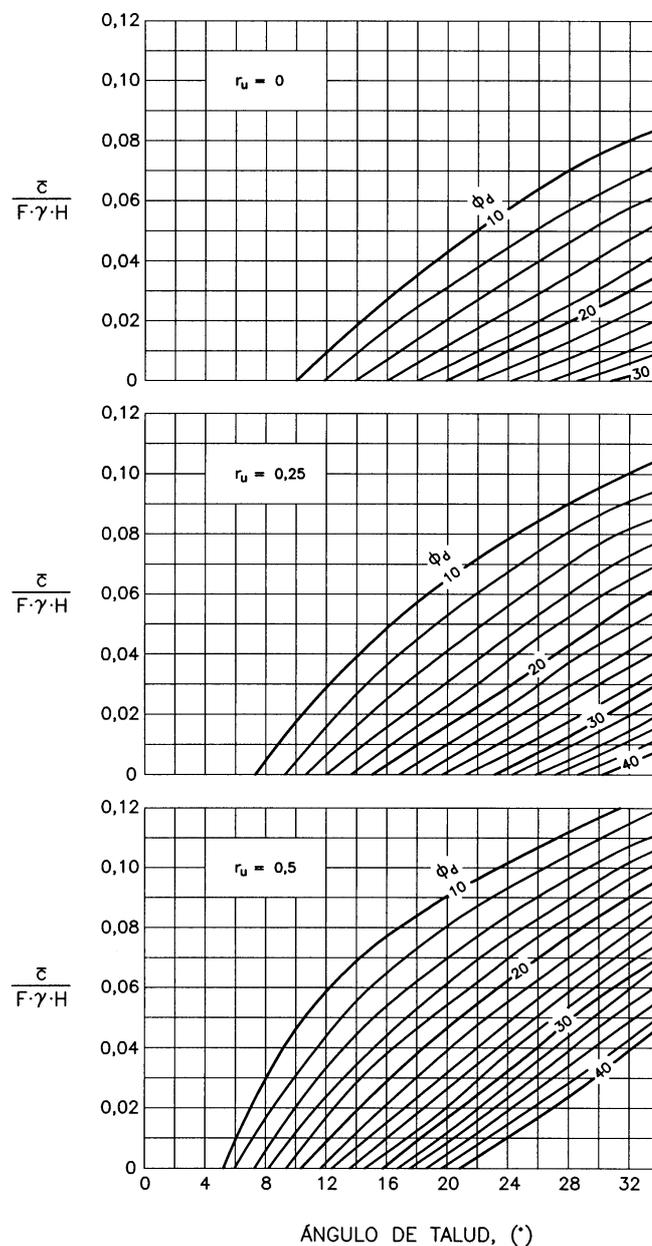


Figura 6.11. Gráficos de estabilidad para varias presiones intersticiales (Spencer, 1967).

Se debe tener en cuenta que los gráficos son sólo aplicables para valores del ángulo de inclinación del talud comprendidos entre 0° y 34° .

6.6.1.4. Gráficos de Janbu

Los gráficos y fórmulas desarrolladas por Janbu (1954, 1967) son una de las más versátiles y con mayor aplicación en casos reales. Los gráficos de Janbu están basados en el método de Fellenius, por lo que se asumen las mismas hipótesis de partida y errores, aunque se debe tener en cuenta que estos gráficos deben servir de herramienta para una evaluación preliminar de la estabilidad de taludes.

Janbu presenta un número de gráficos y fórmulas que proporcionan un rápido entendimiento para evaluar la estabilidad de taludes homogéneos, usando parámetros de tensiones efectivas con combinaciones de los valores de B y c , y teniendo en cuenta los efectos de sobrecarga, nivel freático y grietas de tracción. Janbu también elaboró una serie de gráficos para la localización del centro de rotación del círculo crítico de rotura. Todos los gráficos para $B > 0$ suponen una rotura en el pie del talud.

La ventaja principal del método de Janbu es que la estabilidad de cualquier talud puede ser obtenida a partir de un gráfico. Los gráficos son particularmente útiles para una rápida evaluación de los efectos que un cambio en el ángulo de inclinación del talud o en su altura producen sobre el factor de seguridad. Para la obtención del ángulo de inclinación del talud, altura del mismo y propiedades del material a utilizar, dado un factor de seguridad, se debe realizar un proceso iterativo.

Los gráficos de Janbu ya han sido expuestos en su utilización práctica, cuando se hizo referencia a los gráficos de Taylor en el epígrafe 6.6.1.1, al realizar Janbu modificaciones de los originales realizados por Taylor.

6.6.1.5. Gráficos de Hoek y Bray

En los ábacos de Hoek y Bray (1977) se puede obtener un límite inferior del factor de seguridad, a partir de la hipótesis de que las tensiones normales en la superficie de deslizamiento se concentran en un único punto. Además, se considera el efecto de las presiones intersticiales debidas a la presencia del nivel freático del terreno, que divide el talud en una zona seca y otra saturada.

Por lo tanto, existen ábacos para talud totalmente seco, totalmente saturado y para tres casos intermedios con diferentes alturas del nivel freático, como se puede apreciar en la Fig. 6.12.

Además, se deben tener en cuenta las siguientes simplificaciones:

- S El material que forma el talud se considerará homogéneo.
- S El círculo de rotura pasará siempre por el pie del talud.
- S Se considera la presencia de una grieta de tracción situada por encima o debajo de la cresta del talud.

La situación de la grieta de tracción y del centro del círculo de rotura harán mínimo el factor de seguridad para cada talud estudiado.

Análisis de estabilidad de escombreras

Los gráficos de Hoek y Bray son los representados en la Fig. 6.13, donde los parámetros de cada caso serán la altura del talud, H, la cohesión efectiva del terreno, c', el ángulo de rozamiento interno efectivo, B', el peso específico del terreno, fl, y el factor de seguridad, F.

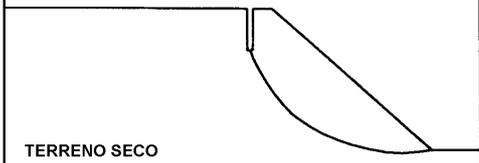
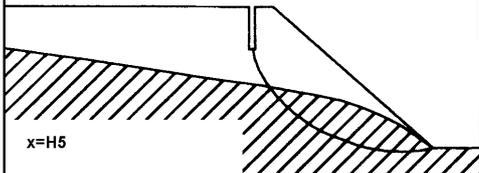
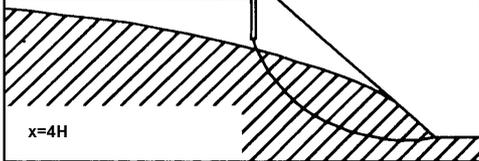
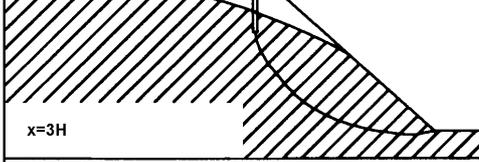
SITUACIONES DE LA LÍNEA DE SATURACIÓN	NÚMERO DE ÁBACO
 <p>TERRENO SECO</p>	1
 <p>x=H/5</p>	2
 <p>x=4H</p>	3
 <p>x=3H</p>	4
 <p>TERRENO SATURADO</p>	5

Figura 6.12. Distintas situaciones de la línea de saturación. (Hoek y Bray, 1977).

En la práctica, los gráficos se utilizarán de la siguiente manera:

- S Se selecciona el gráfico cuyas condiciones de nivel freático se acerquen más a las del talud en cuestión.
- S Se calcula el valor del parámetro definido por:

$$\frac{c'}{fl \cdot H \cdot tg B'}$$

obteniendo una recta radial en el ábaco elegido.

- S La intersección de dicha recta con la curva correspondiente al ángulo del talud dará un valor para cada una de las siguientes expresiones:

$$\frac{tg B'}{F} \qquad \frac{c'}{f_l \cdot H \cdot F}$$

Cualquiera de las dos servirá para obtener el factor de seguridad buscado.

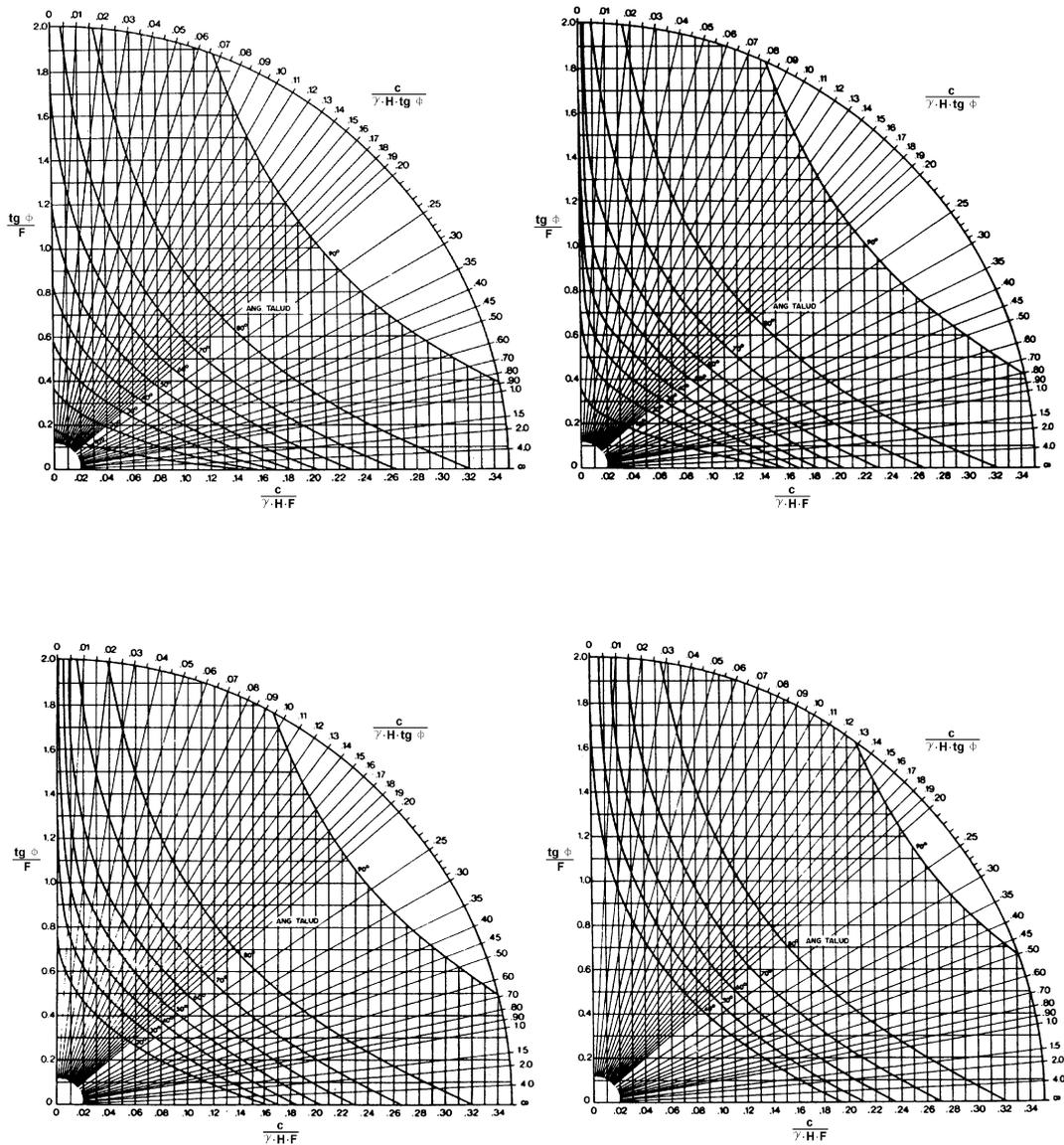


Figura 6.13. Ábacos para rotura circular (Hoek y Bray, 1977).

6.6.1.6. Gráficos de Huang

El método creado por Huang (1977) se basa en un concepto diferente a los anteriores métodos, ya que trata

Análisis de estabilidad de escombreras

de alcanzar la estabilidad mediante la colocación de un material sobre la ladera inclinada preexistente, Fig.6.14. El depósito suele tener una forma triangular, aunque también puede ser trapezoidal.

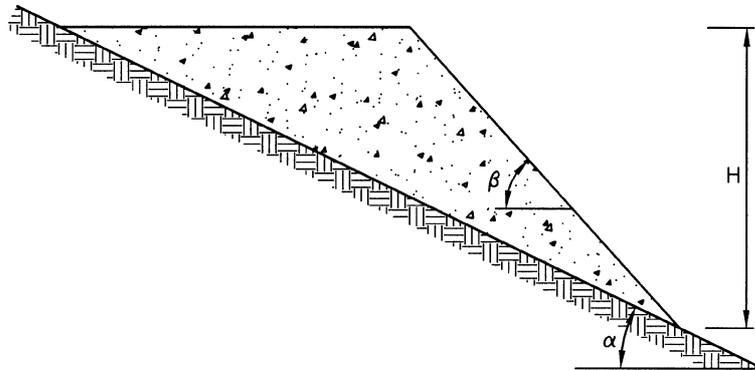


Figura 6.14. Relleno a media ladera (Huang, 1977).

En la aplicación del método, el efecto del agua vendrá indicado a través del parámetro del coeficiente de presión intersticial, r_u , de forma que la fuerza debida a la presión intersticial será vertical y con valor igual a la presión vertical de tierras multiplicada por dicho factor, por lo que la resistencia por rozamiento de un suelo será igual a la resistencia para presión intersticial nula, multiplicada por $(1-r_u)$. El método de Huang será válido para aplicaciones prácticas de geometría simple y para diseños preliminares.

El material del talud y del relleno son, en general, diferentes, por lo que se pueden considerar tres casos:

1. Rotura planar

En los casos en que se produzca rotura plana, Fig. 6.14, el factor de seguridad, F , del relleno, a través de la superficie de contacto con el talud, es:

$$F = \frac{c' + (1/r_u) \cdot W \cdot \cos \alpha \cdot \tan \beta'}{W \cdot \sin \alpha}$$

donde:

- c' y β' = Parámetros resistentes del relleno.
- r_u = Coeficiente de presión intersticial.
- W = Peso del relleno, obtenido mediante la siguiente expresión:

$$W = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot \csc \alpha \cdot \csc \beta \cdot \sin(\alpha/\beta)$$

donde:

γ = Peso específico del relleno.

Por lo tanto, la expresión definitiva para el factor de seguridad será:

$$F = \frac{2 \cdot \sin \alpha \cdot \operatorname{cosec} \beta \cdot \operatorname{cosec} (\gamma / \beta)}{f_l \cdot H} \left[\frac{c'}{f_l \cdot H} + (1 / r_u) \cdot \operatorname{tg} B' \cdot \operatorname{cotg} \alpha \right]$$

2. Rotura circular incluida totalmente en el relleno

En los casos de rotura circular se utilizan una serie de ábacos, Fig.6.15, donde vendrán dados los diferentes factores de seguridad, que tendrá la siguiente expresión:

$$F = C_f \cdot N_s \cdot \left[\frac{c'}{f_l \cdot H} + \frac{(1 / r_u) \cdot \operatorname{tg} B'}{N_f} \right]$$

donde:

- c' y B' = Parámetros resistentes del relleno.
- N_f = Número de rozamiento, hallado mediante el ábaco de la Fig. 6.5.
- N_s = Número de estabilidad, hallado a partir del ábaco de la Fig. 6.5.
- C_f = Factor de corrección, conocido mediante el ábaco de la Fig. 6.16.

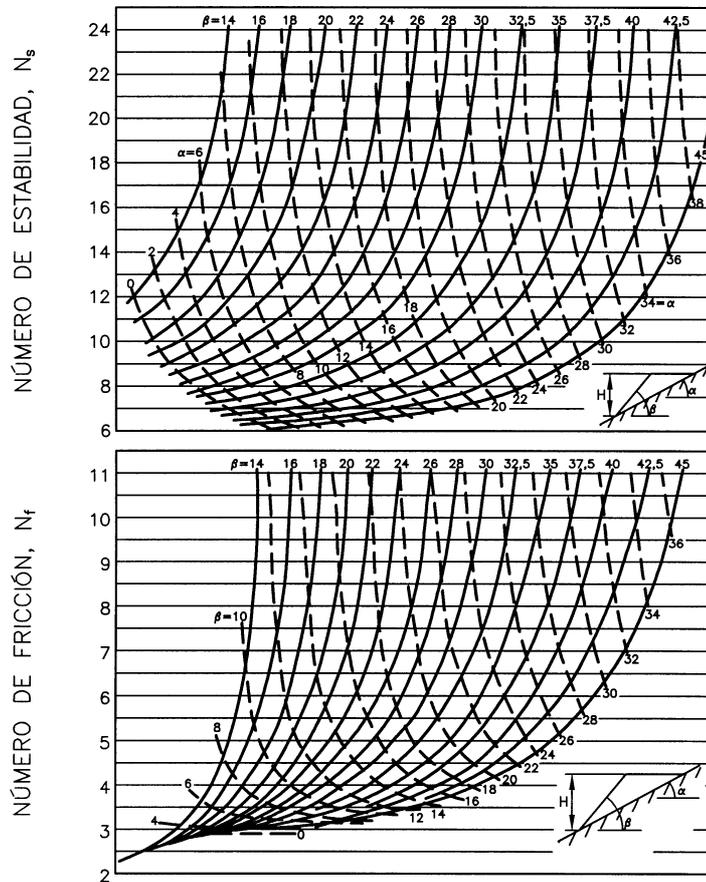


Figura 6.15. Gráficos de estabilidad para rellenos en depresión (Huang, 1983).

Análisis de estabilidad de escombreras

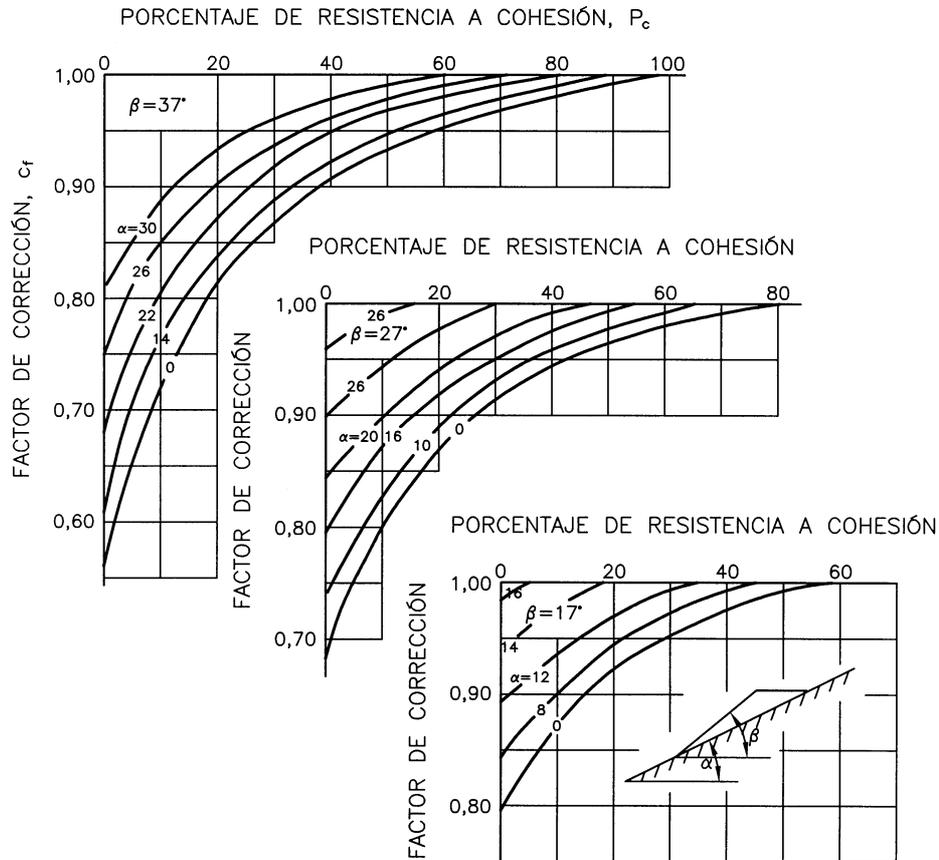


Figura 6.16. Gráficos de corrección del factor de seguridad (Huang, 1983).

3. Rotura circular pasando por el terreno del talud preexistente

Un esquema de este tipo de rotura se puede apreciar en la Fig. 6.17, donde *suelo 1* indica el relleno y *suelo 2* el terreno natural. La profundidad se cuantifica por el índice de profundidad D , que es la relación entre la profundidad de un plano paralelo al terreno y tangente al círculo, y la altura del relleno.

La expresión que define el factor de seguridad en este caso, para un valor de D dado es:

$$F = N_s \cdot \left[\frac{c'_1}{f \cdot H} \cdot L_1 + \left(\frac{c'_2}{f \cdot H} \right) \cdot (1/L_1) + (1/r_{u1}) \cdot \text{tg } B'_1 \cdot F_1 + (1/r_{u2}) \cdot \text{tg } B'_2 \cdot F_2 \right]$$

donde:

- N_s = Número de estabilidad (tabulado).
- L_1 = Fracción de arco de círculo contenido en el suelo 1 (tabulado).
- F_1, F_2 = Factores de rozamiento del suelo 1 y 2 (tabulados).
- c'_1, c'_2 = Cohesión efectiva de los suelos 1 y 2.

- r_{u1}, r_{u2} = Coeficientes de presión intersticial de los suelos 1 y 2.
- B'_1, B'_2 = Ángulos de rozamientos interno efectivos de los suelos 1 y 2.
- fl = Peso específico medio de los suelos 1 y 2.

Los valores de los parámetros tabulados dependerán de los parámetros geométricos, aunque en las tablas aparezcan divididos en tres casos:

- Caso 1 : suelo cohesivo, $B = 0$.
- Caso 2 : caso intermedio, $B = 30^\circ$.
- Caso 3 : suelo no cohesivo, $c = 0$.

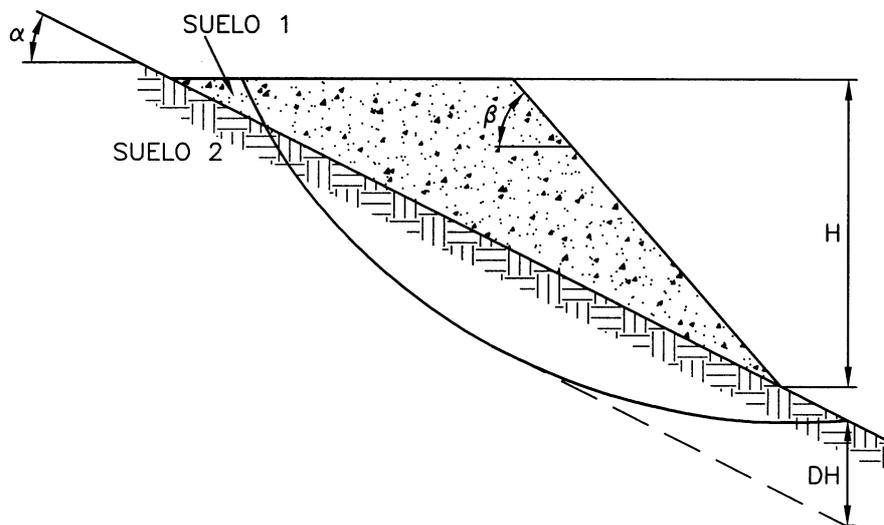


Figura 6.17. Rotura circular pasando por el terreno del talud preexistente (Huang, 1983).

6.6.1.7. Gráficos de Cousins

Los gráficos de Cousins (1978) son un método muy versátil para la evaluación de superficies circulares de rotura cuando existe un terraplén a lo largo del talud, en su pie o a través de la base. Como la mayoría de los métodos vistos hasta ahora, es aplicable para materiales homogéneos.

Los gráficos se hallan basándose en el método de Taylor modificado para permitir la evaluación de la presión ejercida por el agua. Cousins utiliza dos grupos de gráficos para definir el factor de seguridad y la localización del centro del círculo de rotura. El primero de ellos está formado por tres gráficos para la rotura en el pie del talud y otros tres para el caso de rotura a través de la base del terraplén, en función de los valores 1, 1,25 y 1,5 que toma la altura denominada D (normalmente 1). Además, los gráficos variarán en función de los valores de la presión de poros, r_u , que tomarán los valores de 0, 0,25 y 0,5. Para valores de D y r_u que no coincidan con los dados se deberá realizar una interpolación.

En los casos en que D tome el valor 1 y r_u sea 0, sólo serán necesarios dos gráficos, Figs. 6.18 y 6.19, para obtener el factor de seguridad y el centro del círculo de rotura.

Observando la Fig. 6.18, se puede apreciar que la determinación del factor de seguridad se realiza en función

Análisis de estabilidad de escombreras

de la presión de poros, r_u , los parámetros c y B , la altura del talud, H , su ángulo de inclinación, β , y el factor de profundidad, D . Este gráfico es aplicable para ángulos de inclinación del talud comprendidos entre 0° y 45° .

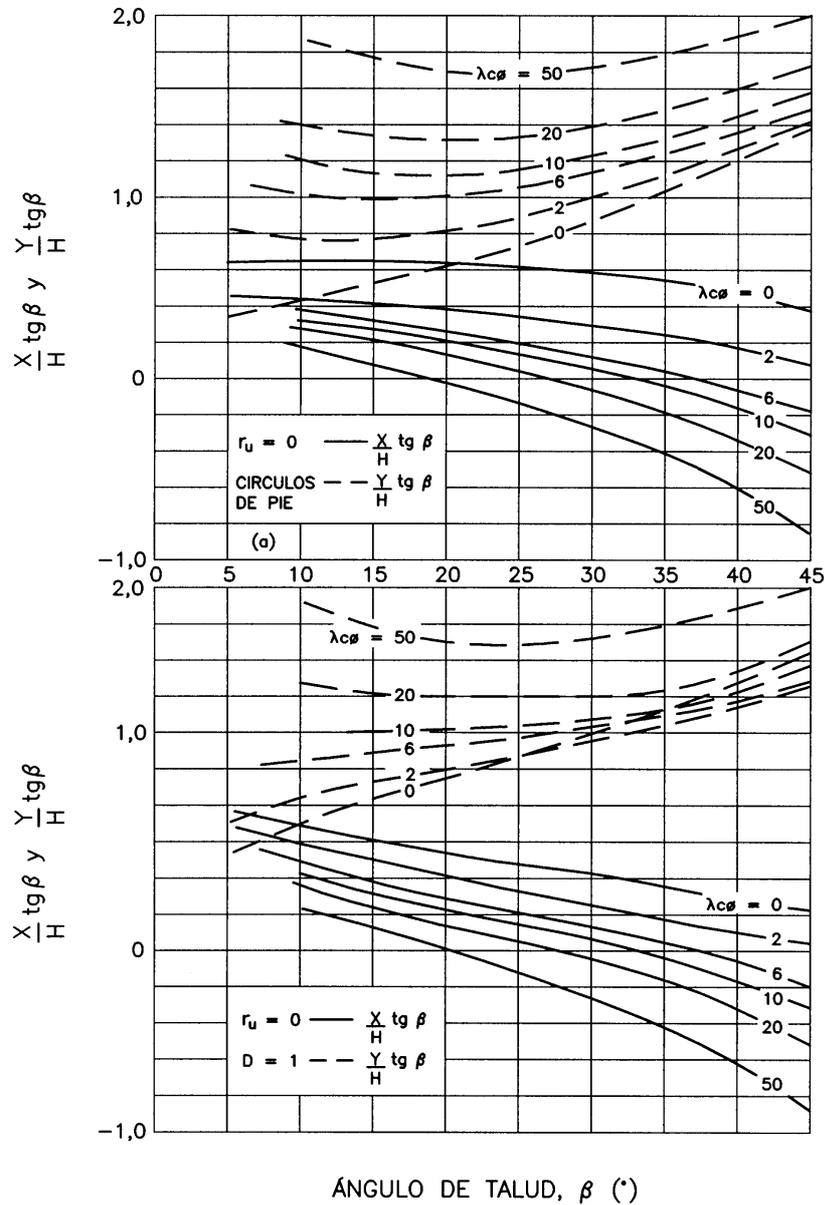


Figura 6.18. Coordenadas del círculo crítico de rotura (Cousins, 1978).

Para la utilización de los gráficos de Cousins se deben hallar los parámetros de entrada N_f y i_{cB} definidos como:

$$N_f \text{ fi } \frac{F \cdot f|_w \cdot H}{c} \quad , \quad i_{cB} \text{ fi } \frac{\text{tg } B}{\left(\frac{c}{f|_w \cdot H} \right)}$$

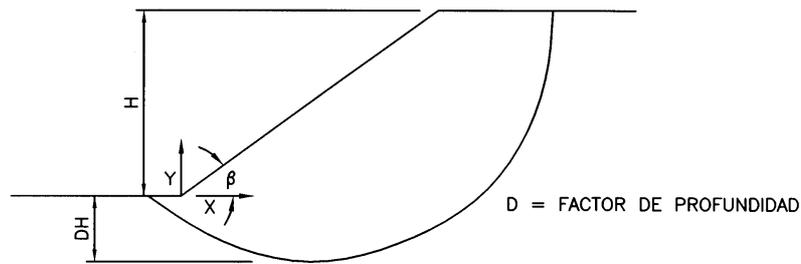
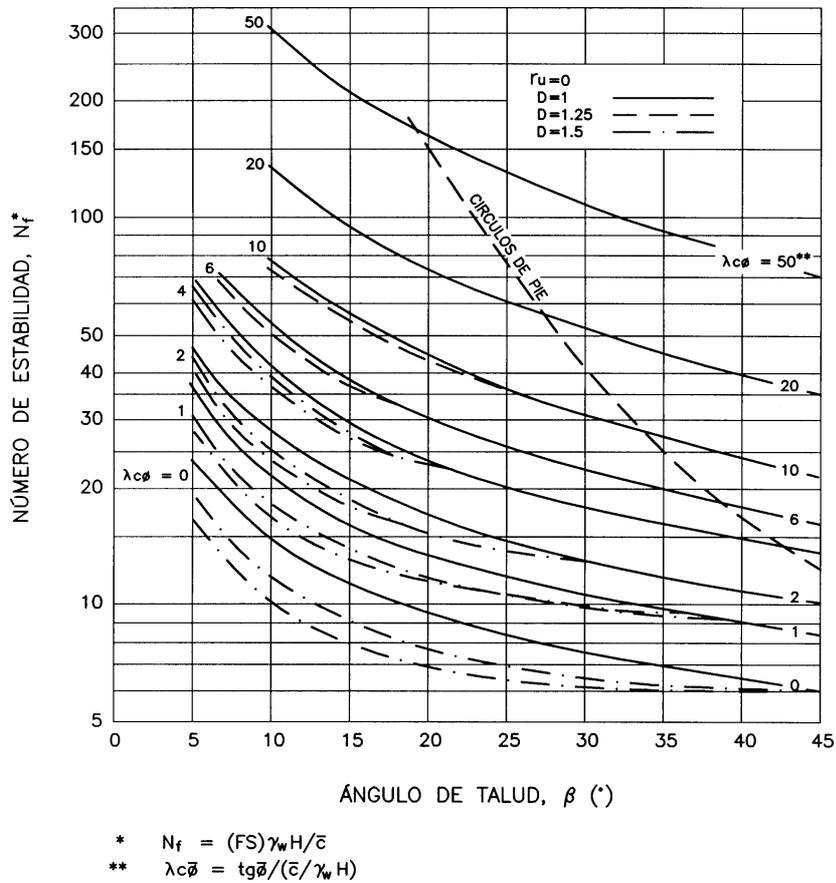


Figura 6.19. Gráficos de estabilidad para roturas de pie y de base (Cousins, 1978).

La Fig. 6.19 se utiliza para la determinación de las coordenadas del centro de rotación del círculo crítico de rotura para el caso en el que la rotura se produzca en el pie del talud, el valor de D sea 1 y el valor de r_u sea 0. Para entrar en dicho gráfico se utilizarán los parámetros del ángulo de inclinación del talud y el valor de $\lambda c \bar{\phi}$.

Las coordenadas obtenidas se obtendrán en función de H y β .

En la práctica, se operará de la siguiente forma:

1. Normalmente se partirá de los datos del ángulo de inclinación del talud, β , y de la altura del mismo, H.

Análisis de estabilidad de escombreras

2. El valor del factor de profundidad, D , tomará el valor 1.
3. Se calculará el valor del parámetro i_{cB} según la expresión anterior.
4. Entrando en la Fig. 6.18 con los datos de β , D y i_{cB} , se determina el número de estabilidad N_f .
5. Se calcula el valor del factor de seguridad utilizando la expresión:

$$F = \frac{c \cdot N_f}{H \cdot \gamma_w}$$

6. Para determinar las coordenadas del centro del círculo de rotura, se entrará en la parte inferior de la Fig. 6.19 debido a que $D=1$ y $r_u=0$, con los datos de β y i_{cB} para determinar los valores de

$$\frac{X}{H} \cdot \tan \delta \quad y \quad \frac{Y}{H} \cdot \tan \delta$$

7. Se calculan los valores de X e Y a partir de las expresiones anteriores.

6.6.2. Método del equilibrio límite (M.E.L.)

Los métodos de equilibrio límite son unos métodos ampliamente utilizados debido al alto grado de conocimiento que se posee de los mismos, lo que da lugar a conocer sus límites y su grado de confianza.

Los métodos de equilibrio límite utilizan un factor de seguridad para cuantificar la seguridad de un talud cualquiera, que se supone constante en toda la superficie de deslizamiento y que se define como el cociente entre la resistencia al corte en la superficie de deslizamiento y la necesaria para mantener el equilibrio estricto de la masa deslizante.

Estos métodos aplican las ecuaciones de la estática a dicha masa deslizante, suponiendo que los parámetros del terreno, c , B , se dividen por el factor de seguridad, F . Se supondrá que la resistencia al corte sigue la ley lineal de Mohr-Coulomb.

Cuando la superficie de rotura no sea conocida, se calcularán los factores de seguridad de un cierto número de superficies, definiéndose el factor de seguridad del talud como el mínimo de los anteriores.

Como ya ha sido comentado anteriormente, en la mayoría de los casos se utilizan métodos de resolución no exactos, destacando los métodos de fajas, debido a su facilidad de aplicación a un gran número de problemas con gran exactitud. Además, se podrán considerar las acciones realizadas por presiones intersticiales, cargas externas o materiales de diferentes características.

Centrándose en los métodos de fajas, se debe conocer que se considerará un problema bidimensional, analizándose la estabilidad del talud en una sección transversal del mismo, de tal forma que la zona del terreno que pueda sufrir deslizamiento se divide en una serie de fajas verticales, estudiándose el equilibrio en cada una de ellas.

TABLA 6.7. Cuadro-resumen de los métodos de análisis mediante gráficos.

GRÁFICOS DE REFERENCIA	TÉCNICA DE ANÁLISIS	FACTOR r_u	RANGO ÁNGULOS DEL TALUD (°)	RANGO DE f (°)	LOCALIZACIÓN CÍRCULO CRÍTICO	FACTOR D	COMENTARIOS
Taylor	Círculo de fricción	Ninguno	0-90	0-25	No		Sólo válido para círculos que pasan por el pie del talud. Sencillez. Necesidad de iteraciones para $f \times 0$.
Bishop-Morgenstern	Bishop	Todos	11-27	10-40	No	1,0-1,5	Necesidad de más de cuatro gráficos. Difícil de utilizar en análisis inverso.
Spencer	Spencer	0, 0,25 y 0,5	0-34	10-40	Sí		Útil en análisis inversos.
Janbu	Fellenius	Todos	11-90	Todos	Sí		Círculo de rotura pasará por el pie para grietas de tracción, sobrecargas y análisis preliminar.
Hoek-Bray	Círculo de fricción	5 gráficos	0-90	Todos	Sí		Círculo de rotura pasará por el pie para grietas de tracción.
Huang	Círculo de fricción	0 y 0,5	14, 18, 22, 27, 34, 45	0-40	Sí		Sólo círculos por pie de talud. Necesidad de iterar. Adecuado para taludes no homogéneos.
Cousins	Círculo de fricción	0, 0,25 y 0,5	0-45	Todos	Sí	1, 1,25 y 1,5	Método muy completo y útil.

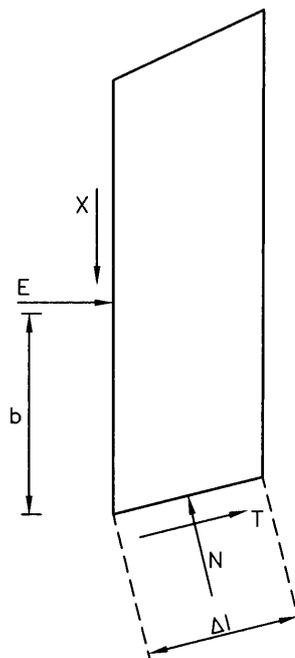
Análisis de estabilidad de escombreras

En el caso de que aparezcan n fajas semejantes a las de la Fig. 6.20, el número de incógnitas que se deben tener en cuenta será:

- n valores de la fuerza N de la base.
- $n-1$ valores de las fuerzas tangenciales X en las caras laterales.
- $n-1$ valores de las fuerzas normales E en las caras laterales,
- $n-1$ valores de b que definen los puntos de aplicación de estas últimas.
- 1 valor del factor de seguridad F .

En total aparecerán $4 \cdot n - 2$ incógnitas y se tendrán $3 \cdot n$ ecuaciones, por lo que el problema será indeterminado ya que habrá $n-2$ incógnitas más que ecuaciones.

Para poder llegar a una solución se deberá incrementar el número de ecuaciones ayudándose de las relaciones tensión-deformación del suelo además de la compatibilidad de las deformaciones, o bien disminuir el número de incógnitas.



$$T = \frac{1}{F} (c \cdot \Delta l + N \cdot \text{TAN } \phi)$$

Figura 6.20. Sistemas de fuerzas actuantes sobre una faja (CEDEX, 1995).

Los métodos de fajas aproximados (Bishop, Fellenius y Janbu) realizan hipótesis sobre la dirección o posición de los empujes laterales entre fajas, que eliminan $n-1$ incógnitas, no cumpliéndose todas las ecuaciones de equilibrio. Estos métodos consisten en comenzar por la parte alta del talud, suponiendo que cada faja se apoya sobre la siguiente como si apareciera un empuje activo, hasta llegar al plano de la vertical del centro del círculo de rotura. Al mismo tiempo y por la parte baja del talud, actuará un empuje pasivo, de tal forma que, con dicha resistencia pasiva y con el empuje activo, se pueda definir el factor de seguridad. Se trata de

métodos muy laboriosos y construcciones gráficas poco exactas, por lo que son poco utilizados, excepto los métodos simplificados creados por Fellenius y Bishop.

Por otro lado, los métodos de fajas precisos (Bishop completo, Morgenstern-Price y Spencer) hacen la hipótesis de que los $n-1$ valores de las fuerzas tangenciales siguen una ley general que depende de un nuevo parámetro (nueva incógnita) que soluciona el problema. Estos métodos satisfacen las $3 \cdot n$ ecuaciones de equilibrio, para lo cual se necesitan hacer $n-2$ hipótesis. Su precisión depende de la precisión de las hipótesis y de la forma de la línea de rotura, ya que son válidos para cualquier forma de éstas. Se debe tener en cuenta que el usar métodos precisos de cálculo no proporciona una mayor precisión en los resultados de c y B , que siempre estarán sujetos a errores de medida.

Al final de esta sección se expone una tabla resumen de todos los métodos que utilizan el equilibrio límite como herramienta de cálculo, Tabla 6.8.

6.6.2.1. Método de Fellenius

El método de Fellenius (1936) parte de la idea de que la resultante de las fuerzas X y E aplicadas en las caras opuestas de cada faja son iguales, por lo que se compensan unas con otras. Esta hipótesis considera que las bases de cada faja son paralelas, hecho que no es real y que incluye un error.

Este método y el de Bishop son válidos únicamente para superficies de rotura circulares, ya que el valor del factor de seguridad se obtiene tomando momentos de todas las fuerzas respecto al centro del círculo de rotura.

Las fuerzas normales N de las bases de cada faja se determinan por la siguiente ecuación:

$$N = W \cdot \cos \alpha$$

donde:

W = Peso de cada faja.

α = Ángulo de inclinación de la base de cada faja.

La expresión para hallar el factor de seguridad es la siguiente:

$$F = \frac{[c \cdot R + (W \cdot \cos \alpha / u) \cdot R \cdot \tan B]}{W \cdot R \cdot \sin \alpha}$$

donde:

c = Cohesión del material.

R = Radio del círculo de rotura.

u = Presión intersticial en la base de cada faja.

B = Ángulo de rozamiento interno del material.

Análisis de estabilidad de escombreras

Esta expresión de F es válida para cualquier caso de superficie de rotura circular.

Este método proporciona resultados con un error máximo del 10 % siempre que B y u sean nulos y el ángulo de inclinación del talud, β , sea mayor que 20°. En otras condiciones el error puede llegar al 60 %.

El procedimiento de análisis será el siguiente:

1. Se elige una superficie de rotura circular.
2. Se divide la superficie de rotura en 5 o más fajas o rebanadas.
3. Se determina el peso de cada faja, W_i .
4. Se determina el espesor de cada faja, e, y el ángulo de inclinación de la base de las mismas, α .
5. Se anotan los datos referentes a las propiedades del material: c, B y u.
6. Se opera con los datos anteriores a fin de obtener el factor de seguridad F.

Una ventaja de este método es que proporciona un mayor margen de seguridad en cuanto a posibles variaciones de los parámetros geotécnicos del suelo; sin embargo, se debe tener en cuenta que los resultados obtenidos de F pueden ser algo menores de los reales.

6.6.2.2. Método de Bishop simplificado

El método simplificado de Bishop (1955) es el método más aceptado, de forma general, para problemas geotécnicos debido a su diversa aplicabilidad y fiabilidad a roturas de tipo circular.

En este método, se toma la hipótesis de no tener en cuenta la fuerza tangencial X de cada faja, simplificando las ecuaciones de equilibrio, y teniendo al factor de seguridad y a las fuerzas normales a la base de cada faja como incógnitas, ya que las fuerzas normales a las caras de cada faja, E, se anulan unas con otras.

Para determinar el valor de N se usará la siguiente fórmula:

$$N_i = \frac{[W_i / u \cdot e / c \cdot e \cdot \tan \alpha]}{\cos \alpha \cdot \left(1 + \frac{\tan \alpha}{\tan \beta}\right)} \cdot \frac{1}{F}$$

De esta forma, se puede obtener la expresión para hallar el factor de seguridad F:

$$F = \frac{\sum [c \cdot e \cdot R + (W \cdot u \cdot e) \cdot R \cdot \tan \beta]}{\sum W \cdot R \cdot \sin \alpha}$$

donde:

$$m = \cos \alpha \cdot \left(1 + \frac{\tan \alpha \cdot \tan \beta}{F}\right)$$

Para simplificar las soluciones de m_α se puede utilizar el gráfico de la Fig. 6.21.

La resolución del factor de seguridad es algo más compleja que en el método anterior al tener que realizar un proceso iterativo, pero, en general, se suelen necesitar entre 3 y 5 iteraciones.

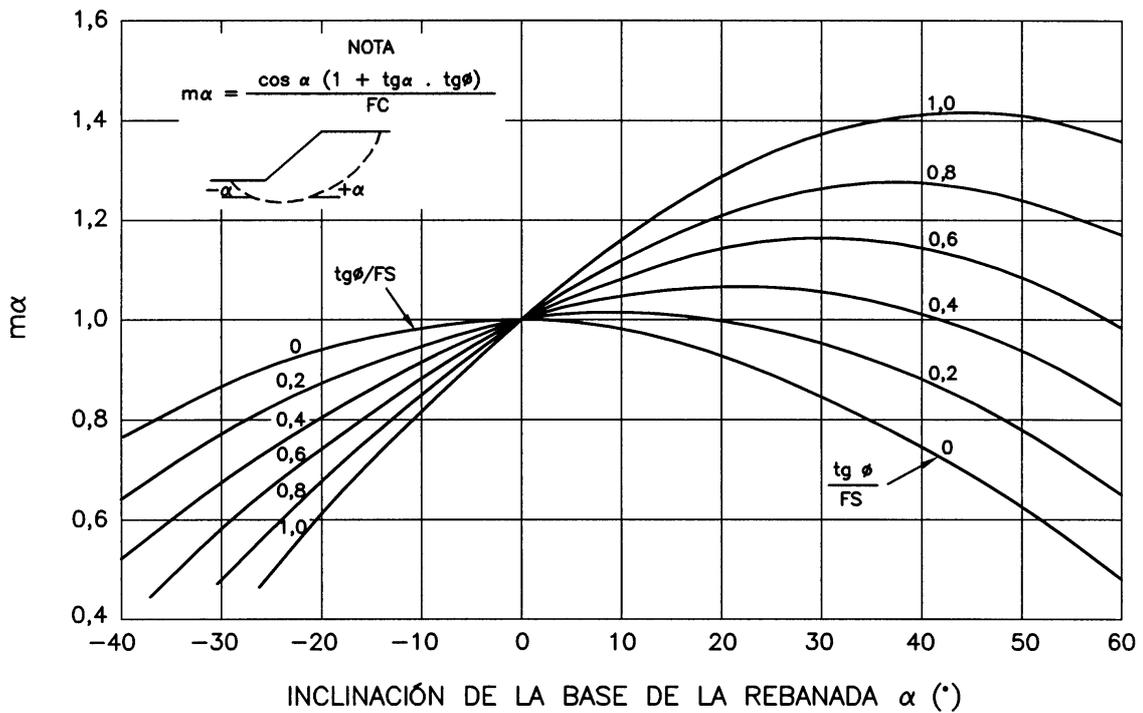


Figura 6.21. Gráfico para la determinación de m_α .

Las ecuaciones de equilibrio de momentos, por otro lado, permiten hallar los valores de b , mientras que las ecuaciones de equilibrio horizontal darían los valores de E .

El procedimiento de análisis de un problema sigue los mismos pasos que en el caso de que se utilice el método de Fellenius.

Este método, por último, resulta más exacto que el creado por Fellenius y los errores, en general, no pasan del 7 %, excepto en un par de situaciones conflictivas como son cuando los ángulos de inclinación de la base de las fajas sean menores de 0, y cuando el factor de seguridad sea menor de 1 y la presión intersticial muy grande.

6.6.2.3. Método de Janbu

Los dos métodos anteriores están basados en la ecuación de equilibrio de momentos y no cumplen la ecuación de equilibrio horizontal. Para solucionar esto, Janbu (1955) propuso un método aplicable a líneas de deslizamiento de cualquier tipo y que satisface el equilibrio horizontal y el vertical. La ecuación obtenida

Análisis de estabilidad de escombreras

para hallar el factor de seguridad que es implícita y que contiene las fuerzas desconocidas tangenciales a las caras verticales de cada faja.

Janbu propuso realizar un primer cálculo suponiendo que estas fuerzas sean nulas, dando el criterio de cumplimiento de la ecuación de equilibrio de momentos para obtener una segunda aproximación.

Para cumplir con dicha ecuación se recomienda suponer que las fuerzas entre fajas actúan a una distancia de un tercio de la altura. Así, fijando una cierta línea de actuación, se podrían escribir n ecuaciones de equilibrio de momentos que deberían satisfacer las n-1 fuerzas tangenciales.

6.6.2.4. Método de Bishop completo

Este método es el más antiguo de los métodos precisos y sólo es válido para superficies de deslizamiento circulares.

Su fundamento es idéntico al método modificado del mismo autor, con la salvedad de que los valores de la cohesión no serán constantes y tomarán valores cualesquiera. Esta variación alterará las ecuaciones del factor de seguridad y se busca, después de calculado F, el equilibrio horizontal, que no existirá al hacerse n-1 hipótesis, por lo que se irán alterando ordenadamente los valores de la cohesión, de forma que al final exista equilibrio en el sentido horizontal, siendo esto equivalente a considerar n-2 hipótesis.

6.6.2.5. Método de Spencer

Spencer (1967) desarrolló un método de fajas que, con varias hipótesis, satisface el equilibrio del deslizamiento para roturas circulares, aunque, modificado, también se puede aplicar a cualquier tipo de rotura. Las hipótesis realizadas se basan en suponer que la resultante de las fuerzas que actúan sobre cada lateral de faja son paralelas y que el punto de aplicación de las fuerzas normales es el centro de la base de cada faja. Con estas hipótesis el problema queda determinado estáticamente con 3·n incógnitas y 3·n ecuaciones procedentes del equilibrio estático.

Las fuerzas normales N a la base de cada faja son conocidas a partir de las fuerzas verticales y horizontales ejercidas en cada faja por la siguiente ecuación:

$$N = \left[W - (X_i - X_{i+1}) \cdot u \cdot e - (c \cdot e \cdot \tan \alpha) \cdot \left(\frac{1}{F} \right) \right] \cdot \frac{1}{m}$$

La solución para hallar el factor de seguridad implica la doble solución de dos ecuaciones, una de momentos, F_m , y otra de fuerzas, F_f . La ecuación de momentos, que serán tomados en el centro del círculo de rotura, será de la siguiente forma:

$$F_m = \frac{\sum [c \cdot e \cdot R + (W - X_i - X_{i+1}) \cdot u \cdot e] \cdot R \cdot \tan \alpha}{\sum W \cdot R \cdot \sin \alpha}$$

Las fuerzas en la dirección horizontal, por su parte, se expresan con la expresión:

$$\sum (E_i / E_{\psi_1}) + \sum N \cdot \sin \alpha / \sum (S \cdot \cos \alpha + u \cdot e \cdot \operatorname{tg} \alpha) = 0$$

donde:

S = Fuerza tangencial en la base de cada faja.

La nueva expresión del factor de seguridad hallada a partir del equilibrio de fuerzas tendrá la siguiente forma:

$$F_f = \frac{\sum c \cdot e + N \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \cos \alpha}{\sum [N \cdot \sin \alpha + u \cdot e \cdot \operatorname{tg} \alpha]}$$

Estas dos ecuaciones de F se resuelven mediante variación en los valores del ángulo de inclinación de las fuerzas, hasta hallar aquella inclinación que resuelve ambas ecuaciones, Fig. 6.22.

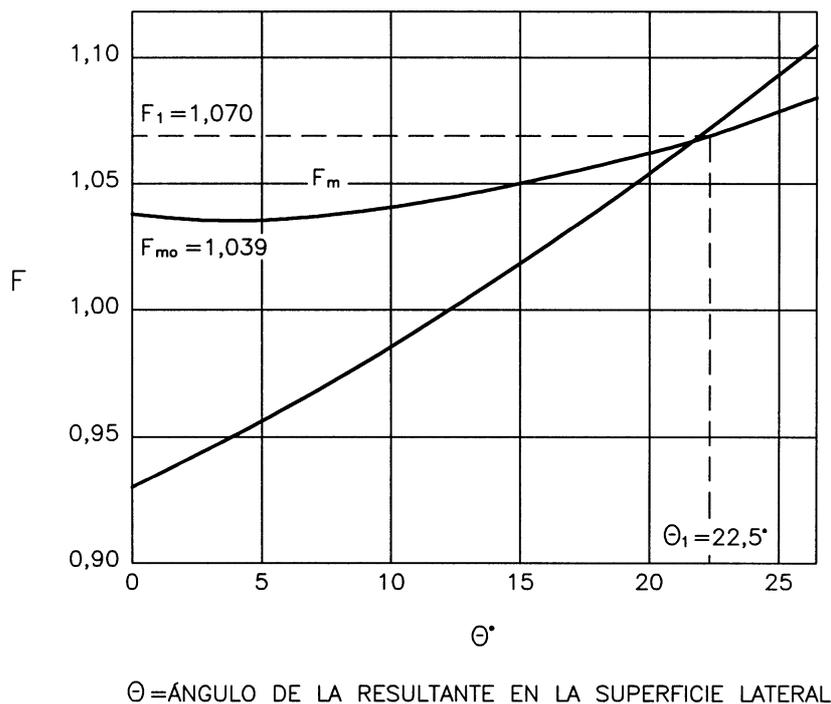


Figura 6.22. Variación de F_m y F_f con θ (Spencer, 1967).

En general la ecuación de F respecto al equilibrio de fuerzas es más sensible a la variación en el ángulo de inclinación que la ecuación respecto a momentos.

Como se ha comentado, este método, con las modificaciones pertinentes realizadas por Wright (1969), es adaptable a superficies de rotura no circulares aplicando la siguiente fórmula:

Análisis de estabilidad de escombreras

$$F_{fi} = \frac{[c \cdot e \cdot R + (W + X_i / X_{v1} / u \cdot e) \cdot R \cdot \text{tg} B] \cdot \frac{1}{m}}{W \cdot d + [W + X_i / X_{v1} + (u \cdot e \cdot \text{tg} B \cdot c \cdot e) \cdot \frac{\text{tg}''}{F}] \cdot \frac{f}{m}}$$

donde:

- d = Brazo del par de W.
- f = Brazo del par de N.

Los errores producidos por este método en los resultados obtenidos, tanto para superficies circulares como no circulares, son menores del 2 %, siendo recomendable el uso de ordenador para su resolución.

6.6.2.6. Método de Morgenstern-Price

Morgenstern y Price (1967) propusieron un método capaz de satisfacer todas las ecuaciones de equilibrio, al suponer que la componente tangencial X es una fracción de la componente horizontal E, es decir:

$$X_{fi} = \lambda \cdot f(x) \cdot E$$

donde:

f(x) = Función variable según el tipo de talud y el tipo de terreno que tiene como variable independiente la abscisa horizontal x.

λ = Factor común de corrección en todas las fajas para cumplir el equilibrio.

De esta manera, las ecuaciones de equilibrio horizontal y vertical permiten resolver el problema y obtener F en función de los valores de X. Para el cálculo de X se dispone de las n ecuaciones de equilibrio de momentos y de las n-1 relaciones X-E (2·n-1 ecuaciones), con las que también se podrán obtener los valores de los puntos de actuación de las fuerzas E y el valor de λ.

La idea de Morgenstern es fijar cuál es la forma de la inclinación de las fuerzas entre fajas (f(x)) y resolver el problema completo.

6.6.2.7. Análisis de estabilidad de roturas planares: método de las cuñas

A partir de observaciones en campo, Gonano (1980) identificó la importancia de la correcta interpretación de los fenómenos cinemáticos que aparecen en la rotura de un talud. Como consecuencia, observó que una rotura muy habitual era por deslizamiento sobre un plano de terreno blando y la formación de dos cuñas dentro del talud, Fig. 6.23

La influencia del mecanismo de rotura en el conocimiento de la estabilidad es muy importante y, como

resultado de los trabajos de Gonano, Coulthard desarrolló un método del equilibrio límite de dos cuñas específico para el análisis de estabilidad de escombreras de mina.

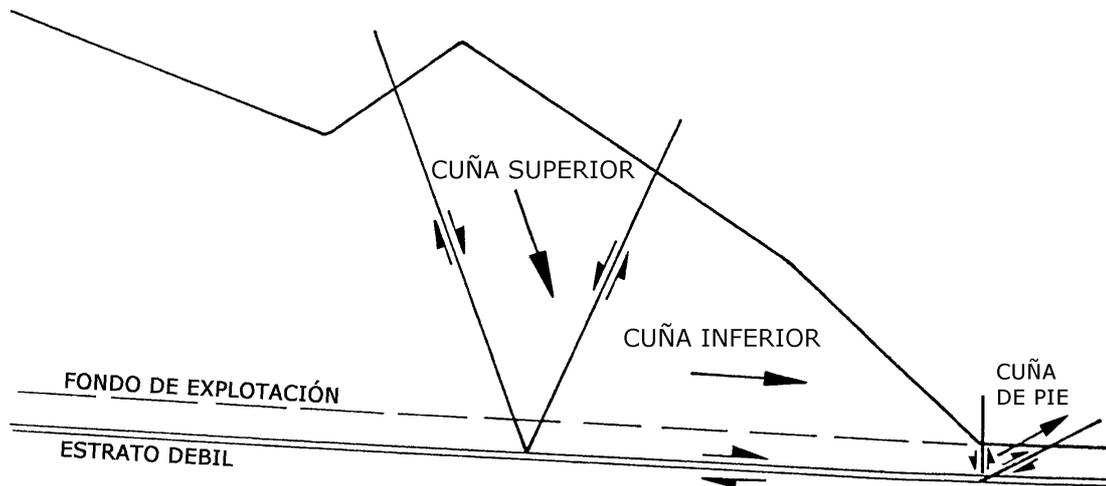


Figura 6.23. Mecanismo de formación de dos cuñas con cuña de pie (Dunbavan, 1983).

El método del equilibrio límite es el análisis más habitualmente utilizado para el estudio de la estabilidad. La mayoría de estos análisis relacionan el modelo numérico a la rotura del talud en campo, por localización del límite de masa de terreno inestable. En el caso relativamente sencillo de dos cuñas, se consigue mayor información para el análisis introduciendo una condición de deslizamiento en el plano situado entre las cuñas.

El principio de trabajo virtual aplicado a la estabilidad de taludes proporciona un medio donde el equilibrio estático de una masa puede derivarse de la conservación de la energía, considerando la cinemática de dicha masa. El uso de trabajos virtuales en sustitución de la dinámica real, simplifica los cálculos para la estabilidad del talud al restringir la aplicación de cálculos a un instante de tiempo en vez de a un tiempo finito necesario en un análisis dinámico. Otra ventaja es la existencia de diferentes variables que pueden ser usadas como criterios de rotura.

Chen (1975) dio una serie de aplicaciones a la estabilidad de taludes en los que define una solución límite inferior y otra solución límite superior. La solución obtenida para un equilibrio límite de dos cuñas sería un límite superior, del mismo modo que la solución dada por el método de trabajo virtual.

Los análisis de equilibrio límite usan el factor de seguridad como indicador de la estabilidad del talud. Este factor deriva de la proporción de fuerzas resistentes y las fuerzas desestabilizadoras en la superficie de deslizamiento. Si el factor de seguridad se considera como la inversa del grado de movilización de la resistencia al corte del material del talud, el método de análisis implica que el grado de movilización debe ser igual en todos los puntos de la superficie de deslizamiento. Por lo tanto, el uso de un factor de seguridad en los análisis de estabilidad puede conducir a una evaluación no real de las condiciones del talud.

Análisis de estabilidad de escombreras

En la Fig. 6.24 aparece una ilustración de las fuerzas que actúan en la cuña activa y en la cuña de pie que se deben conocer para la aplicación de este método en la estabilidad de la cara de vertido. En la cuña activa inclinada los vectores representativos de los parámetros de resistencia al corte de los estériles se consideran perfectamente móviles. Suponiendo el equilibrio límite, se puede calcular el valor de la fuerza R que actúa en la superficie de contacto entre la cuña activa y la de pie. Posteriormente, esta fuerza R se aplica a la cuña de pie hallándose el valor del ángulo de rozamiento interno de la base, B_m , correspondiente al equilibrio límite. El valor del factor de seguridad de la cuña de pie se obtendrá por la proporción entre la tangente del ángulo de rozamiento del estéril, B_r , y la tangente del ángulo de rozamiento de la base, B_m .

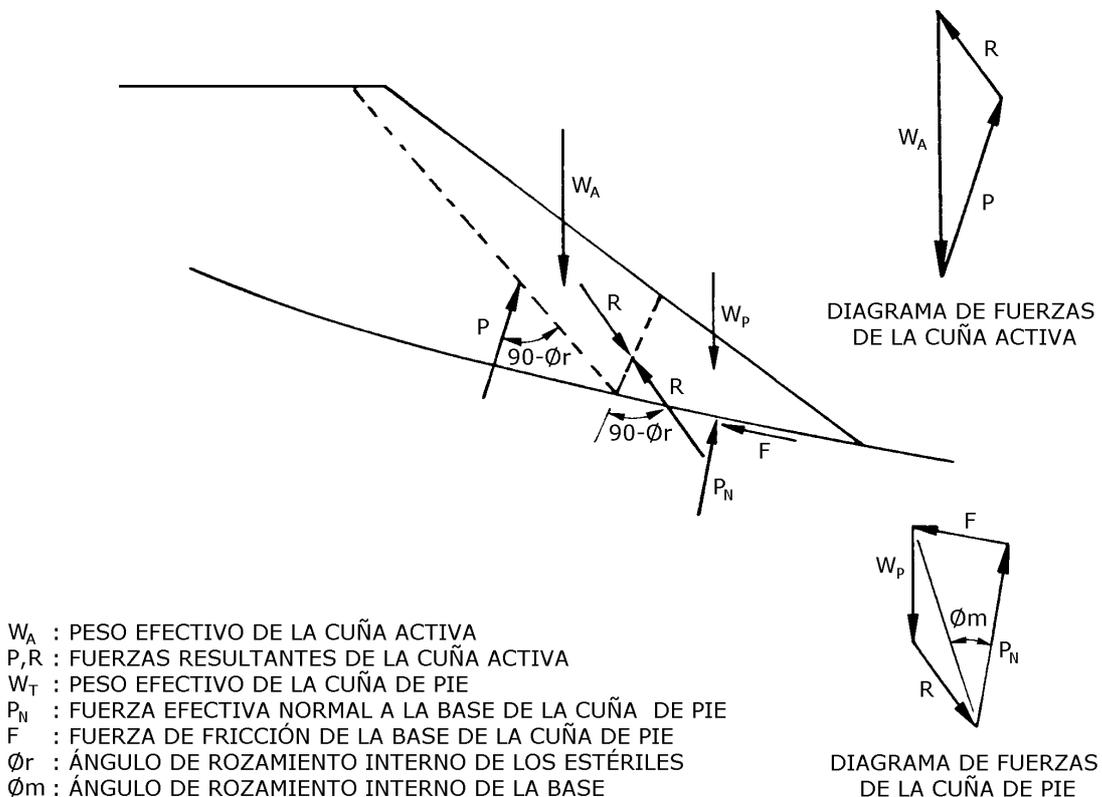


Figura 6.24. Fuerzas que aparecen en el método de las cuñas. (Singhal, 1986).

Como el método del trabajo virtual se basa en la existencia de un mecanismo de rotura de carácter cinemático, la única condición de estabilidad admisible es la resistencia al corte en toda la superficie de rotura. El criterio usado para conocer la estabilidad del talud procede de la energía aportada al sistema, llamado coeficiente de energía, Q:

$$Q \text{ fi } \frac{\text{Energía disipada} / \text{Energía aportada}}{\text{Energía disipada}}$$

donde la energía disipada procede de la resistencia al corte de la superficie de deslizamiento y la energía aportada procede de los cambios de energía potencial de la masa deslizante durante los desplazamientos virtuales.

Esta interpretación es la misma que la utilizada en el análisis estructural y se representa como:

El talud es inestable si $Q < 0$

El talud es metaestable si $Q = 0$

El talud es estable si $Q > 0$

El coeficiente de energía no proporciona información de la localización de la superficie de rotura.

S Cálculos para un mecanismo de rotura de dos cuñas

La aportación al sistema de trabajo virtual se calcula usando el producto de una fuerza de reacción por un desplazamiento virtual a lo largo de la superficie de deslizamiento. Si se conocen los valores de los parámetros geomecánicos que relacionan el peso y la resistencia al corte a lo largo de todo el talud, el sistema de fuerzas con un mecanismo de dos cuñas situadas sobre el mismo talud es estáticamente determinado y se puede resolver analítica o gráficamente. Los desplazamientos virtuales también pueden ser fácilmente calculados usando trigonometría si se asume un desplazamiento virtual unitario a lo largo del plano de deslizamiento.

Aunque la descripción del mecanismo de rotura indica la acción de sólo dos cuñas en movimiento, también se puede incluir una tercera cuña situada en la cresta del talud. Esta tercera cuña aparece cuando el movimiento se produce en un plano de deslizamiento situado a pequeña distancia bajo el nivel de la cresta del talud.

El procedimiento de actuación será el siguiente:

- Se supone una superficie de rotura plana.
- Se divide la masa deslizante en dos o más cuñas.
- Se calcula el peso de cada cuña.
- Se supone un valor para el coeficiente de seguridad, F_1 , y se calculan los valores de la cohesión, c_m , y ángulo de rozamiento interno, B_m , siguientes:

$$c_m \text{ fi } \frac{c}{F_1} \quad \text{tg } B_m \text{ fi } \frac{\text{tg } B}{F_1}$$

- Se construye el polígono de fuerzas para la cuña extrema, descomponiendo el peso según la fuerza que actúa en el plano de contacto con el bloque contiguo (formando un ángulo δ con la normal) y según la normal y tangencial actuantes sobre el plano de rotura. Si se considera el empuje del agua, se deberán aplicar fuerzas efectivas. Se realizará este equilibrio en todas las cuñas hasta la última donde se comprueba el posible equilibrio con los valores hallados de c_m y B_m .

Análisis de estabilidad de escombreras

- Si hay equilibrio, el coeficiente de seguridad es F_1 . Si no existe el equilibrio, se supone otro valor del factor de seguridad F_2 y se inicia el cálculo de nuevo hasta obtener el factor adecuado, que será el de menor valor.

Como existen más incógnitas que ecuaciones se deben realizar una serie de hipótesis, como suponer que el ángulo δ es nulo, o que toma un valor igual a B_m o igual al talud exterior.

En ciertos casos, las superficies de contacto no tienen por qué ser verticales. Además, es frecuente y recomendable el uso de ordenador para la resolución del método.

S Selección de los parámetros del material

Peso unitario

Como el análisis no considera una variedad de capas de estériles, se necesita el valor de un peso unitario de toda la masa para cada cuña de material estudiado.

La estimación de los valores apropiados se realiza teniendo en cuenta la compactación y el contenido de humedad de los estériles y la proporción de material intacto contenido en la cuña.

Esfuerzo cortante en la superficie de deslizamiento

El criterio de rotura de Mohr-Coulomb es el más aceptado para definir la resistencia al corte de los materiales del suelo y de la roca. La simplicidad de los análisis de estabilidad de cuñas no garantiza el uso de un criterio de rotura más detallado. Los análisis necesitan la estimación de un par de valores de los parámetros de esfuerzo cortante (c , B) para cada superficie de deslizamiento. No es correcto suponer que los valores de esfuerzo cortante sean uniformes en toda una superficie de deslizamiento, por lo que se realiza una media de todos los valores tomados.

El uso del criterio de Mohr-Coulomb requiere la elección entre esfuerzos totales o efectivos, teniendo cada una de ellos sus ventajas e inconvenientes. Si se opta por esfuerzos totales, será muy difícil determinar valores reales en laboratorio. Semejante grado de dificultad aparece si se toman esfuerzos efectivos debido a la necesidad de medir la presión intersticial en el momento de la rotura. En cualquier caso, los parámetros de esfuerzos cortantes son difíciles de controlar durante la construcción de escombreras y por la variabilidad de los materiales. En la tabla 6.8 se muestra una discusión sobre la elección entre ambos esfuerzos.

Parámetros de tensión total:

S_u = Resistencia al corte sin drenar.

c_u = Cohesión sin drenar.

B_u = Ángulo de rozamiento sin drenar.

Parámetros de tensión efectiva:

c = Cohesión con drenaje.

B = Ángulo de rozamiento con drenaje.

TABLA 6.8. Elección ente esfuerzos totales o efectivos.

SITUACIÓN	MÉTODO ELEGIDO	COMENTARIOS
1. Final de construcción con suelo saturado; período de construcción pequeño comparado con el tiempo de consolidación	Análisis de S_u con $B=0$ y $c=S_u$ c, B , conociendo la presión intersticial	El análisis de c y B permite controlar la construcción usando la presión intersticial
2. Estabilidad a largo plazo	c_u, B_u	El análisis de c y B permite controlar la construcción usando la presión intersticial
3. Fin de construcción con suelo parcialmente saturado; período de construcción corto comparado con el tiempo de consolidación	c, B , conociendo la presión intersticial	
4. Estabilidad a medio plazo	c, B , conociendo la presión intersticial	La presión intersticial se debe medir en campo

Fuente: Dunbavan (1983)

Un parámetro adicional se incluye en el criterio de rotura: el coeficiente de presión intersticial, r_u :

$$u \text{ fi } r_u \cdot :_n$$

donde:

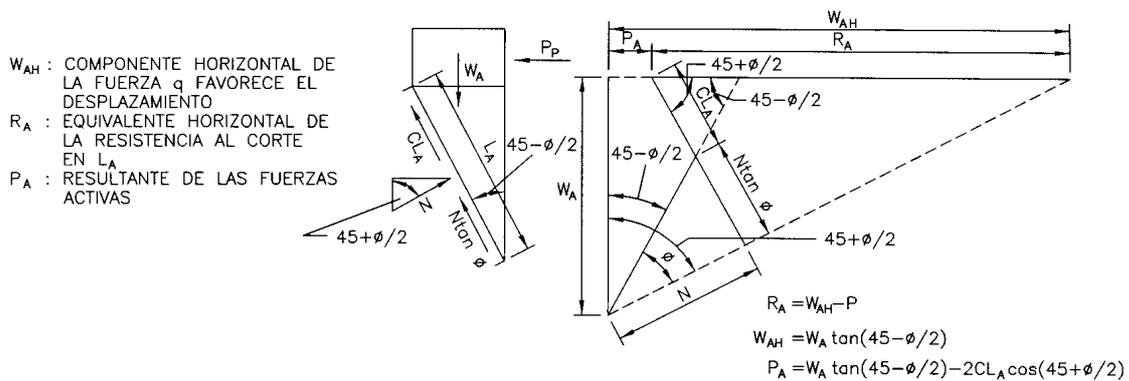
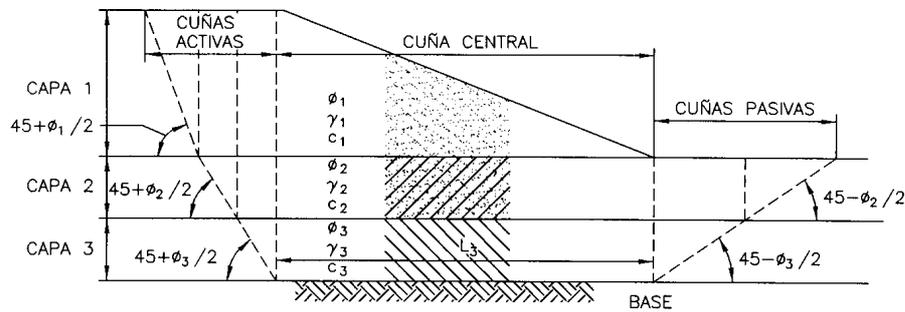
u = Presión intersticial.

$:_n$ = Tensión normal a la superficie.

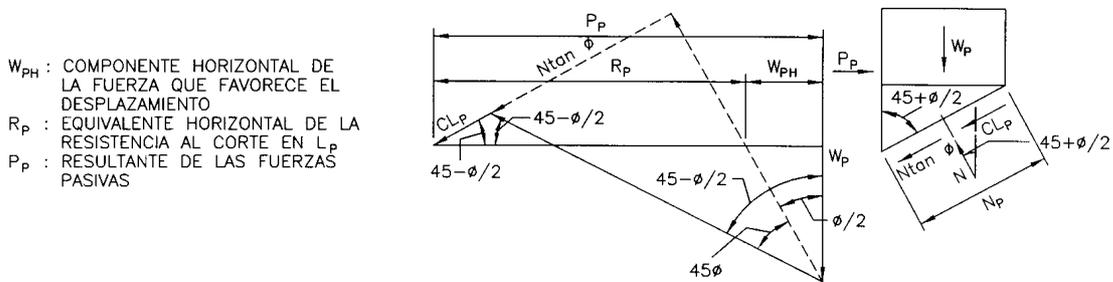
Debido al comportamiento variable del acuífero en las escombreras, el uso del coeficiente de presión intersticial fue ideado para estudios paramétricos para determinar la influencia de la presión del agua subterránea en la estabilidad del talud.

Cuando la escombrera esté construida sobre un estrato blando, se debe efectuar un control especial del valor del factor de seguridad referente a la traslación horizontal. Este control comienza con la elección de una superficie de deslizamiento que pase a través de la capa blanda y la determinación de las componentes de todas las fuerzas actuantes sobre dicha masa deslizante. De esta forma, el grado de seguridad se obtiene por la suma de las componentes horizontales de todas las fuerzas resistentes a la traslación dividida por la suma de las componentes horizontales de todas las fuerzas tendentes a producir dicho desplazamiento. Un ejemplo de este método de análisis se muestra en la Fig. 6.25.

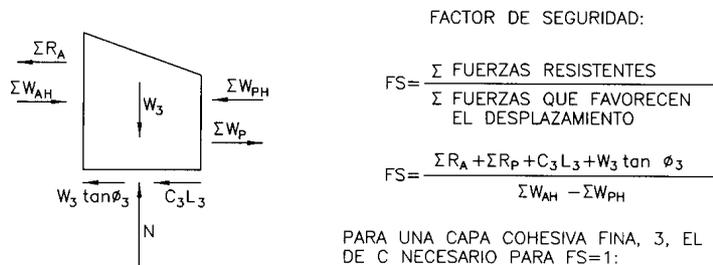
Análisis de estabilidad de escombreras



FUERZAS EN LA CUÑA ACTIVA



FUERZAS EN LA CUÑA PASIVA



PARA UNA CAPA COHESIVA FINA, 3, EL VALOR DE C NECESARIO PARA FS=1:

$$C_{rqd} = \frac{P_A - P_P}{L_3} \quad FS = \frac{C_3}{C_{rqd}}$$

SUMA DE FUERZAS EN LA CUÑA CENTRAL

Figura 6.25. Análisis de estabilidad para traslaciones horizontales (CANMET, 1979).

Análisis de estabilidad de escombreras

TABLA 6.9. Cuadro-resumen de los métodos de equilibrio límite.

PROCEDIMIENTO	CONDICIONES DE EQUILIBRIO QUE SE CUMPLEN				FORMA DE LA SUPERFICIE DE ROTURA	PROGRAMACIÓN EN ORDENADOR	ERROR EN EL FACTOR DE SEGURIDAD	COMENTARIOS
	MOMENTO TOTAL	MOMENTO DE DESLIZAMIENTO	FUERZAS VERTICALES	FUERZAS HORIZONTALES				
Fellenius	Sí	No	No	No	Circular	Sí	± 10 %	Idóneo para $\varphi=0$, $c \neq 0$, $r_u=0$ y $\beta > 25^\circ$
Cuña	No	No	Sí	Sí	Cuña simple	Sí	± 15 %	Posibilidad de grandes errores
Janbu	Sí	Sí	Sí	Sí	Cualquiera	Sí	± 6 %	Cálculo tedioso
Bishop simplificado	Sí	No	Sí	No	Circular	Sí	± 3 %	Cálculo tedioso
Spencer	Sí	Sí	Sí	Sí	Cualquiera	No	- 2 %	Gran versatilidad
Morgenstern - Price	Sí	Sí	Sí	Sí	Cualquiera	No	- 1 %	Gran versatilidad y complejidad

S Tipos de problemas a resolver

Los tipos de problemas a resolver se pueden dividir en dos tipos:

A. Análisis inverso cuando aparece la rotura de un talud y su geometría es conocida.

La información necesaria será el perfil del talud anterior a la rotura y la localización y geometría de la superficie de deslizamiento. Para un mecanismo de dos cuñas, el plano de deslizamiento no suele ser accesible y se debe realizar una estimación de su localización e inclinación, usando datos geológicos y observando las características del material situado en el pie de la escombrera.

La topografía puede ser útil para establecer los vectores de desplazamiento de distintas zonas inestables, que sirvan de ayuda en la clasificación del mecanismo de rotura.

La aparición de dos cuñas suele ocurrir en taludes donde existan dos tipos de materiales diferentes situados en una región inestable, uno de ellos con menor resistencia al corte que el otro.

Si se toman muchos valores de los parámetros de resistencia al corte, el análisis inverso puede llegar a ser muy tedioso por el gran volumen de resultados a interpretar. Por lo tanto, el rango de valores se debe elegir para que la interpretación de los resultados se pueda realizar de forma práctica.

Los resultados del análisis inverso consisten en una combinación de valores de resistencia al corte para una geometría particular de un talud y para un mecanismo de rotura determinado. El criterio más utilizado para estos cálculos es suponer que $Q = 0$, siendo este valor el límite superior.

B. Análisis del diseño cuando las propiedades del material son conocidas y se requiere un diseño del talud.

El objetivo de este análisis es establecer un perfil del talud que sea duradero, siendo conocidos los materiales de construcción. Se supondrá que los valores de resistencia al corte para estos materiales son conocidos y que las condiciones del lugar conducen a la formación de dos cuñas. En esta situación, el análisis del diseño puede ser usado para establecer la mejor localización del mecanismo de rotura y para el cálculo de Q .

El método del equilibrio límite también puede ser usado para estimar la localización crítica de un mecanismo de rotura usando el criterio del mínimo factor de seguridad.

6.6.3. Método de elementos finitos (M.E.F.)

El método de elementos finitos se aplica al cálculo de la estabilidad de taludes a partir de los años 60, mediante el uso de geometría compleja, de las propiedades tensionales y de la presión intersticial.

La idea básica de este método al análisis de estabilidad de taludes consiste en la modelización del perfil del talud en elementos pequeños dentro de los cuales la solución puede suponerse de forma conocida. Para cada elemento de la modelización se dispondrá de una serie de ecuaciones para describir las relaciones

tensionales del material. Para ello, se podrán aplicar las teorías de elasticidad, plasticidad o ambas. Así, se supondrá que dentro de un elemento, el desplazamiento lo da la siguiente expresión:

$$u = [N] \cdot u_n$$

donde:

- [N] = Matriz de funciones. Fijadas a priori.
- u_n = Vector de una serie de puntos (nudos) del elemento.

Las tensiones se aplican al talud por medio del peso del material, de las cargas que aparezcan en el talud y por las presiones intersticiales.

Las deformaciones serán halladas utilizando las teorías adecuadas, teniendo en cuenta que las deformaciones de dos elementos adyacentes se considerarán iguales. La expresión del equilibrio global (relación entre fuerzas y tensiones) se realiza con un procedimiento indirecto, expresando que la energía total del sistema es mínima respecto a los parámetros indeterminados, u_n :

$$[K] \cdot u_n = Q$$

donde:

- [K] = Matriz rigidez.
- Q = Vector de fuerzas nodales.

Para comenzar a solucionar el problema se puede suponer que el material se comporta de forma elástica y lineal, calculando el estado de tensiones y comparándolo con el de rotura, que podrá ser el de máxima tensión y, así, definir un factor de seguridad. Normalmente, se utilizará el criterio de rotura clásico de Mohr-Coulomb que definirá el factor de seguridad como:

$$F = \frac{\sigma_1 / \sigma_3}{\sigma_{1r} / \sigma_{3r}}$$

donde:

- σ_1, σ_3 = Tensiones principales.
- σ_{1r}, σ_{3r} = Tensiones principales de rotura.

Comparando los resultados de este método con los M.E.L. se llega a consecuencias similares, teniendo en cuenta la mayor complejidad de las técnicas del M.E.F., por lo que este método se suele aplicar a casos complejos de estabilidad donde se deseen conocer deformaciones. La principal ventaja de los métodos de elementos finitos es la posibilidad de calcular la estabilidad y el estado de tensiones previo al mismo tiempo, además de reproducir las heterogeneidades conocidas. Su principal inconveniente será su alto coste.

6.6.4. Métodos tridimensionales

Durante los trabajos realizados en minería a cielo abierto, se obtienen grandes cantidades de estériles que son transportados y vertidos en la superficie, o utilizados para rellenar huecos mineros anteriores. En ambos casos, el avance de la escombrera sigue un modelo curvilíneo. El ángulo de reposo de estos taludes es probable que se diferencie de aquellos referentes a un avance en línea recta.

Análisis de estabilidad de escombreras

La estabilidad de las escombreras es fundamental para garantizar la seguridad de los camiones de transporte durante su vertido y a largo plazo. Los análisis de equilibrio límite bidimensional es la técnica más utilizada en el estudio de taludes y en la determinación del factor de seguridad. En estos casos, los taludes se modelan bajo condiciones de tensión planas, donde el talud se considera de longitud infinita y avanzando en línea recta. Basándose en el equilibrio límite, se han desarrollado técnicas más sofisticadas para determinar el factor de seguridad en condiciones tridimensionales. Estos métodos pueden tratar el avance de un talud siguiendo modelos curvilíneos, utilizando cálculos mucho más complejos.

Con la ayuda de la modelización numérica, se puede predecir la respuesta de un talud e identificar las condiciones de colapso a partir de los cambios en el ángulo de fricción. Las propiedades del material pueden ser asignadas dependiendo de las condiciones de tensión, basándose en las condiciones en campo. Una configuración simétrica con respecto al eje de la escombrera semejante a un sólido de revolución permite modelizar taludes que avancen de forma curvilínea. Así, se pueden modelizar taludes en avance cóncavo o convexo al variar la orientación de la red respecto al eje de simetría. El grado de convexidad o concavidad aumenta con el aumento de la medida L o con la disminución de R , respectivamente, Fig. 6.26. Si el valor de L es muy cercano a cero, el talud será similar al formado por el vertido de material desde cinta transportadora, mientras que si los valores de L o R son infinitos, pueden aparecer problemas de convergencia por tensiones planas.

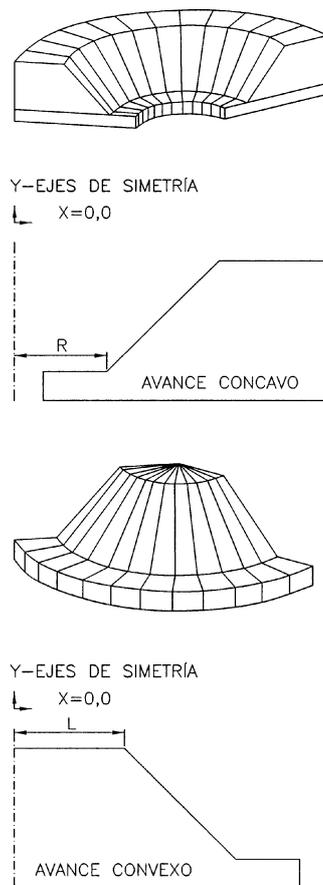


Figura 6.26. Modelización del avance cóncavo y convexo de un talud (IJSM, 1999).

Las modelizaciones aquí descritas pueden realizarse con el programa FLAC.

Como conclusión se puede decir que la adopción de un modelo no lineal de Mohr-Coulomb deriva en un plano de rotura más profundo que al utilizar un modelo lineal. Un talud con un avance cóncavo es estable con una pendiente, al menos, 2° mayor que un talud idéntico avanzando en línea recta. Por otro lado, un talud con un avance convexo es estable con un ángulo de 0,5° más tendido que un talud idéntico avanzando en línea recta.

6.6.5. Cálculo dinámico

Las escombreras dan lugar a dos tipos de problemas dinámicos principales: la colada de escombros y la rodadura de piedras. Además, es aplicable ante fenómenos sísmicos y de licuefacción.

Este método de cálculo parte de la idea de obtener la aceleración crítica que originaría la rotura del talud para, posteriormente, y utilizando el cálculo dinámico, hallar el valor real de la aceleración actuante, conociendo el movimiento sísmico esperado en campo libre, lo que supondrá una ampliación de dicha aceleración.

1. Coladas de escombros

En escombreras de valle o ladera saturadas, bien por infiltración superficial o por oclusión de manantiales, el material puede fluir pendiente abajo formando auténticas coladas con gran capacidad erosiva y de impacto. Un fenómeno análogo puede darse cuando el pie de una escombrera de ladera es socavado por un arroyo de fuerte pendiente y los escombros se deslizan sobre el cauce, siendo arrastrados por las aguas.

También se ha observado que el desmoronamiento de una escombrera sobre un coluvial arenoso o el cauce de un torrente de montaña formado por sedimentos granulares flojos, puede dar lugar a la licuefacción por impacto de estos sedimentos, los cuales fluyen ladera abajo como un líquido de baja viscosidad. La velocidad del flujo de los escombros varía de 3 a 9 m/s, con calados de 1 a 4 m.

Una estimación de la distancia alcanzada por los escombros puede obtenerse por:

$$X_L \approx \frac{V^2}{2 \cdot G}$$

donde:

$$V \approx V_0 \cdot \cos(\theta_1 / \theta_d) \cdot \left(1 + \frac{g \cdot h_0 \cdot \cos \theta_1}{2 \cdot V_0^2} \right)$$

siendo:

$$G \approx g \cdot (\sin \theta_d / S_f \cdot \cos \theta_d)$$

θ_1 = Ángulo de inclinación en el comienzo del flujo. Puede tomarse igual al ángulo del talud de la escombrera.

Análisis de estabilidad de escombreras

θ_0 = Ángulo medio del cauce o ladera sobre el que fluyen los escombros.

V_0 = Velocidad inicial de los escombros (2-3 m/s para si $H < 12$ m y 3-5 m/s para $H > 12$ m).

h_0 = Calado inicial ($\dot{S}H/3$).

S_f = Coeficiente de rozamiento de los escombros que puede estimarse en la Tabla 6.10:

TABLA 6.10. Valores del coeficiente de rozamiento.

	S_f
Escombros finos arcillosos.	0,10
Escombros finos arenosos.	0,30
Escombros gruesos arenosos.	0,45
Gravas, bolos y bloques.	0,60

Fuente: Manual para el Diseño y Construcción de Escombreras y Presas de Residuos Mineros (ITGE, 1986).

Al final del movimiento los escombros quedan con un ángulo de reposo que depende de su naturaleza, contenido de agua en el flujo y forma del cauce por el que discurren. Se han medido ángulos de 10° a 14° para cauces abiertos y de 8° a 12° para cauces encajados. En escombros de muy baja resistencia el ángulo final puede ser de sólo 4° .

Los factores que afectan a la posibilidad de producirse deslizamientos en una escombrera se pueden subdividir por su relación con la topografía, por la naturaleza de suelo natural y por la naturaleza de los estériles, como se puede apreciar en la Tabla 6.11.

1. Factores topográficos

- *Confinamiento transversal*: el efecto del confinamiento en la distancia alcanzada por los estériles puede ser muy importante. En este sentido, el grado de confinamiento se puede definir como: confinado, cuando el vertido está contenido en un valle; parcialmente confinado, cuando la anchura del vertido permanece prácticamente constante; y no confinado, cuando la topografía permite la extensión de los escombros, Fig. 6.27.
- *Confinamiento longitudinal*: algunos deslizamientos terminan al llegar a terrenos relativamente inclinados por lo que las distancias alcanzadas son pequeñas, mientras que, en otros casos, los terrenos inclinados no son impedimento para la continuidad del fenómeno. El grado de confinamiento también influye sobre el ángulo formado por los estériles tras el deslizamiento, siendo menor cuanto mayor haya sido la distancia alcanzada.
- *Planta*: los deslizamientos se pueden clasificar, en planta, como lineales o formando curvas según la topografía de la zona.

TABLA 6.11. Factores que afectan al deslizamiento.

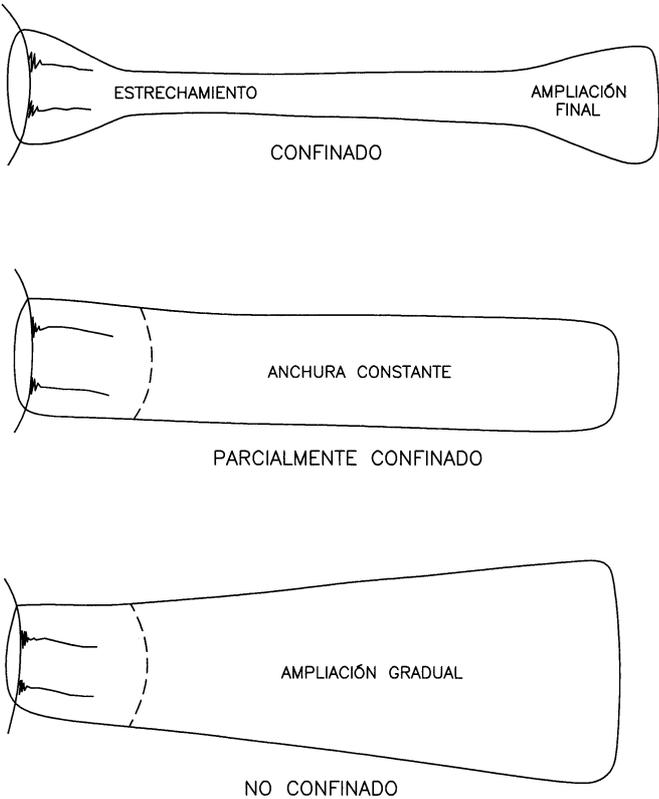
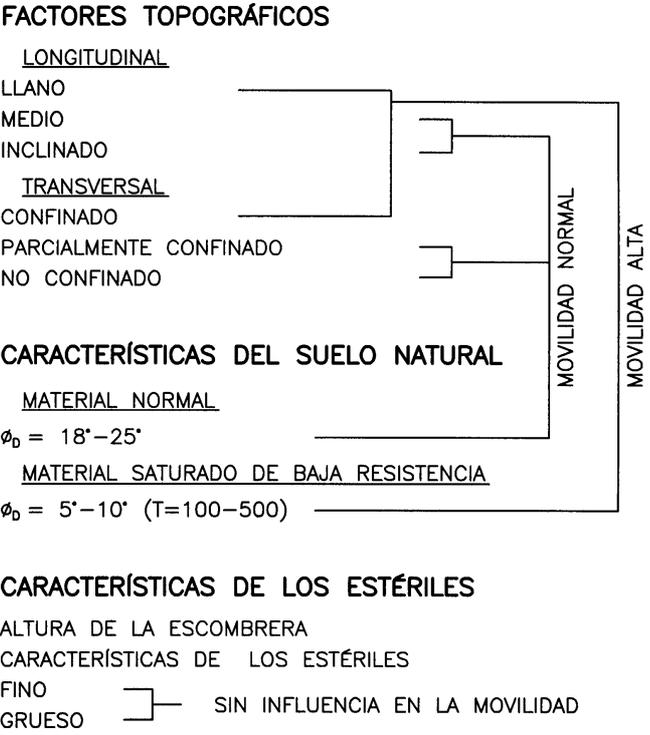


Figura 6.27. Tipos de confinamiento de los escombros (BCMWRPRC, 1995).

2. Naturaleza del suelo natural

El aspecto más importante es el conocimiento de las condiciones del suelo con relación a su pérdida de resistencia bajo cargas instantáneas como son las producidas por un corrimiento. La pérdida de resistencia se determina por la magnitud de la presión intersticial generada durante la carga, que viene determinada por la permeabilidad del suelo y por la disipación de la presión. La resistencia del suelo depende de los siguientes factores:

- *Granulometría*: el tamaño de grano del suelo se clasifica en fino o grueso, o por su proporción de materia orgánica, que son los suelos más propensos a los corrimientos. Los suelos coluviales y glaciales se pueden calificar como terrenos de grano fino, ya que su comportamiento depende de la arcilla y sedimentos presentes, y se caracterizan por no presentar un drenaje libre bajo cargas rápidas, mientras que los terrenos con granulometrías gruesas corresponden al caso contrario.
- *Densidad*: los suelos densos deslizan por efectos de corte sin generar una presión intersticial excesiva. Los suelos tenderán a contraerse cuando se aplique una carga, provocando una presión intersticial excesiva si el suelo está saturado.
- *Grado de saturación*: los suelos secos o parcialmente saturados no generan una presión intersticial tan importante como la producida en los suelos saturados. Es lógico pensar que el grado de saturación varía según las condiciones climatológicas. Las pendientes de topografía uniforme están formadas por terrenos menos saturados que los taludes o barrancos.

3. Naturaleza de los estériles

La naturaleza de la masa deslizante y el momento de la rotura afectan por medio de los siguientes factores:

- *Altura de la escombrera*: es obvio que la movilidad de un deslizamiento estará influenciada por la energía potencial disponible. Por lo tanto, las escombreras de pequeña altura sufrirán deslizamientos de menor importancia, alcanzando distancias menores.
- *Volumen*: las roturas producidas en escombreras de anchura aproximadamente igual a la altura de la cara de vertido alcanzan mayores distancias que las producidas en escombreras más estrechas.
- *Granulometría*.
- *Grado de saturación*: los estériles de grano fino están sometidos a pérdidas de resistencia si se alcanza la saturación como resultado de la excesiva presión intersticial producida por su las cargas aplicadas.

Un método utilizado para el estudio de los deslizamientos se basa en la premisa de suponer una relación entre el área de la escombrera, A, y volumen, V:

$$A \propto c \cdot V^n$$

donde:

c = Constante relacionada con la magnitud del corrimiento.

n = Coeficiente de energía (< 2/3).

Se define la distancia del deslizamiento, L_e , como la longitud del depósito, de la forma:

$$L_e \text{ fi } \frac{A}{B}$$

Además, se define el coeficiente de deslizamiento, R , como:

$$R \text{ fi } \frac{L_e}{B}$$

Por lo tanto, se obtiene la siguiente igualdad:

$$L_e \text{ fi } (R \cdot c \cdot V^n)^{\frac{1}{2}}$$

Las relaciones entre el área del depósito, A , y su volumen, V , para deslizamientos de movilidad normal y alta, junto con las distancias alcanzadas son, respectivamente, las siguientes:

$$A \text{ fi } 74,5 \cdot V^{0,5}$$

$$L_e \text{ fi } (74,5 \cdot R)^{\frac{1}{2}} \cdot V^{\frac{1}{4}}$$

y

$$A \text{ fi } 22,8 \cdot V^{0,662}$$

$$L_e \text{ fi } (22,8 \cdot R)^{\frac{1}{2}} \cdot V^{\frac{1}{3}}$$

Una medida más directa es la distancia a partir del pie del talud, L_{pie} , conociendo el volumen de la escombrera, aplicando las siguientes ecuaciones:

$$L_{pie} \text{ fi } \frac{A}{B}$$

$$R \text{ fi } \frac{L_{pie}}{B}$$

$$L_{pie} \text{ fi } (R \cdot c \cdot V^n)^{\frac{1}{2}}$$

Cuando se conozca la altura de la escombrera se podrá utilizar la siguiente ecuación:

Análisis de estabilidad de escombreras

$$L_{pie} = \frac{(c \cdot R)^{\frac{1}{2}} \cdot e \left(\frac{h \cdot G}{D} \right)^{\frac{1}{N}}}{F} + E$$

donde:

- h = Altura de la escombrera.
- c, R, N, D, E, F y G = Son constantes que toman los siguientes valores.

TABLA 6.12.

PARÁMETRO	MOVILIDAD NORMAL	MOVILIDAD ALTA
c	75	22
R	0,5-10	10-100
N	4	3
D	73	73
E	133	0
F	0,6917	0,8958
G	739	739

2. Rodadura de piedras

Cuando en las proximidades del pie de la escombrera existan instalaciones, viales etc., debe prevenirse la rodadura de piedras que, cayendo por el talud, pueden alcanzar tales zonas.

El mayor peligro es cuando se vierten grandes bloques desde volquete sobre escombros duros de menor tamaño y en taludes de gran altura.

La protección frente a bloques rodantes puede conseguirse mediante:

- A. Zanjas o cunetones de retención.
- B. Muros de pie.
- C. Barreras de carriles, cables elásticos, etc.

Para el dimensionamiento de las zanjas de retención pueden seguirse las indicaciones de la Fig. 6.28.

Por lo tanto, para realizar una correcta protección de la zona, se debe establecer una zona de seguridad por detrás de la línea que determina la distancia máxima que alcanzan las piedras. Se recomienda que esta zona comience en la línea de máxima distancia alcanzada por las piedras y tenga una extensión correspondiente a la mitad de la distancia al pie del talud, Fig. 6.29.

La determinación de la zona de seguridad tras el pie del talud debe considerar la situación del personal y de la maquinaria, así como las instalaciones permanentes.

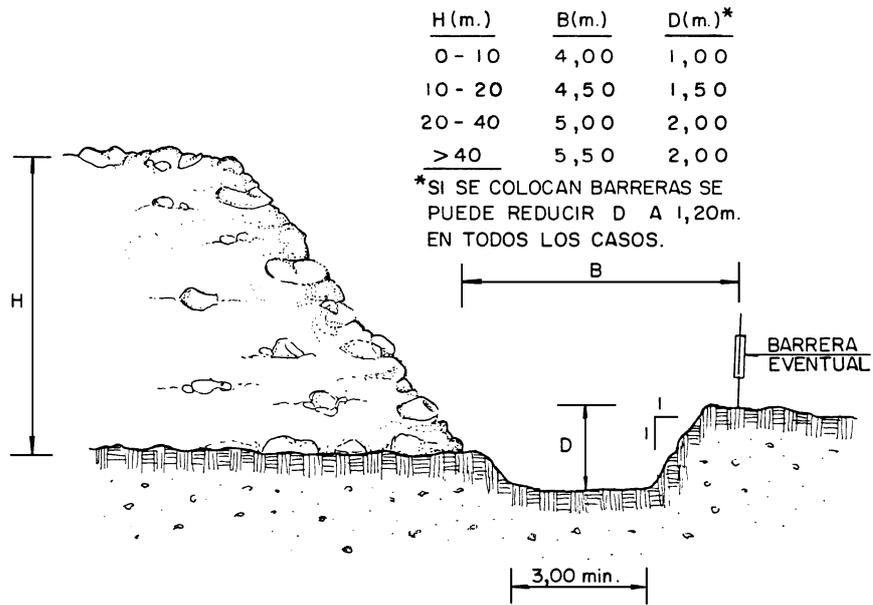


Figura 6.28. Contención de piedras rodantes (ITGE, 1986).

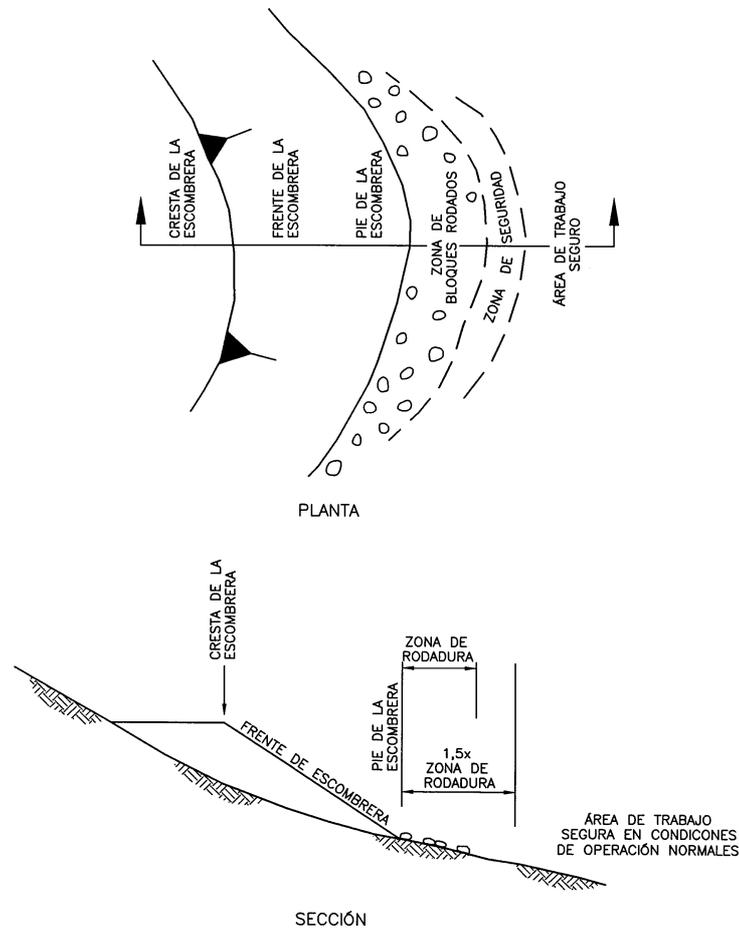


Figura 6.29. Planta y sección de la zona de seguridad (BCMWRPRC, 1991).

Análisis de estabilidad de escombreras

Los sistemas de vigilancia de movimientos de terreno pueden avisar o impedir la rotura del talud, además de dar tiempo a la evacuación del personal y de la maquinaria de las zonas de peligro tras el pie del talud. Las instalaciones permanentes que no pueden moverse de inmediato, se deberán situar por detrás de la zona que pueden alcanzar los estériles y, en algunos casos, protegidos por bermas.

La distancia alcanzada por la rodadura de piedras es muy variable y depende de varios factores. Heim (1932) describe un tipo de rotura donde los estériles alcanzan grandes velocidades y pueden llegar a grandes distancias. Otros autores han descrito métodos matemáticos para la determinación de esta distancia que, debido al gran número de variables que intervienen y al poco conocimiento de los mecanismos que se desarrollan, resultan muy difíciles o imposibles de aplicar.

Campbell (1981) halló una relación empírica entre la altura de la escombrera y el ángulo formado por la rodadura, determinando que el menor ángulo formado por dicha rodadura de piedras tendrá un valor de 11°.

3. Análisis sísmicos

Las técnicas de análisis de estabilidad de escombreras sujetas a cargas dinámicas (terremotos) se pueden dividir en dos tipos: técnicas pseudoestáticas y técnicas de tensión-deformación.

Los análisis pseudoestáticos se suelen realizar utilizando las técnicas habituales de equilibrio límite, modificadas convenientemente para incorporar una constante desestabilizadora en sentido horizontal que representa los efectos de un terremoto. La magnitud de esta fuerza se determina a partir de la evaluación de riesgo sísmico de la zona, que proporciona la magnitud del terremoto esperada y la aceleración sufrida por el terreno.

Como los terremotos son fenómenos dinámicos, con direcciones y magnitudes de aceleración superficial variables en el tiempo, los análisis pseudoestáticos no son un buen modelo para representar sus condiciones físicas, y suelen dar resultados excesivamente conservadores.

Los análisis de estabilidad dinámicos basados en las técnicas de tensión-deformación, proporcionan una visión más realista de los impactos sísmicos. Sin embargo, estos métodos tienden a ser mucho más complejos y necesitan suposiciones relativas a la historia sísmica de la zona, así como una gran variedad de parámetros para modelizar la respuesta de la cimentación y de la escombrera. En general, las técnicas dinámicas muestran la deformación interna de la escombrera que se espera que se produzca durante el terremoto, en términos de resistencia al corte.

Una práctica habitual en el estudio sísmico de una escombrera es comenzar con una evaluación estática de su estabilidad usando técnicas de equilibrio límite, para, posteriormente, realizar un análisis pseudoestático para mejorar la apreciación inicial. Si este análisis indica un bajo valor del factor de seguridad (< 1), se realizará un análisis dinámico más complejo.

Las escombreras deben seguir diseños sismorresistentes. Para ello se ha de comprobar que existe seguridad mediante la realización de las investigaciones y estudios necesarios, estimando los efectos de un terremoto sobre los taludes, Fig. 6.30.

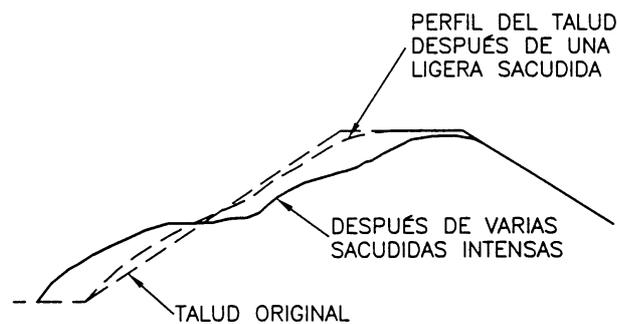
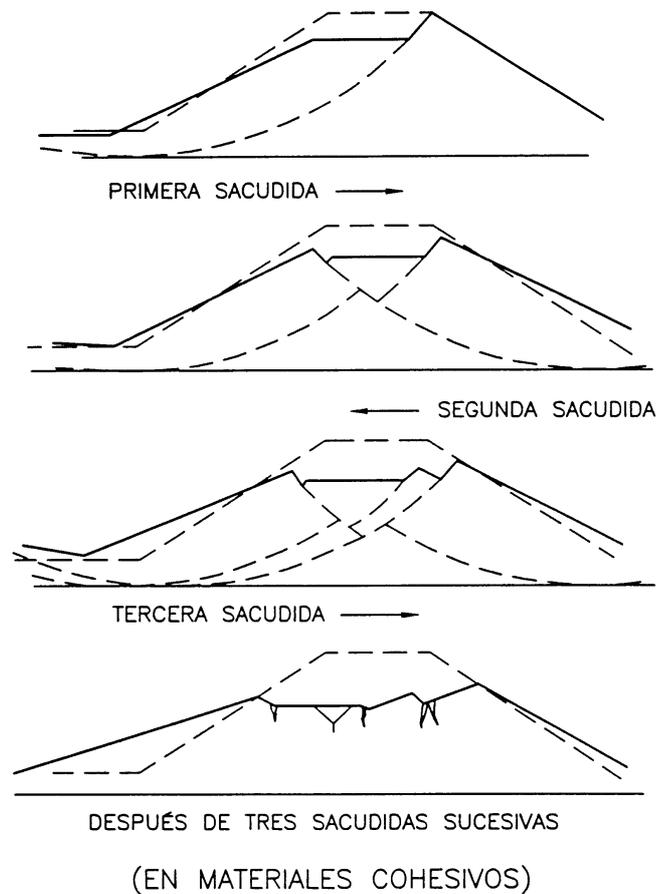


Figura 6.30. Deformación de un talud debido a un terremoto.

Con respecto a la acción sísmica que se puede producir en la construcción y conservación de escombreras, es de aplicación la Norma de Construcción Sismorresistente NCSE-94. En dicha norma se realiza una clasificación de las construcciones a partir de la gravedad de las consecuencias que se pudieran originar en caso de producirse un terremoto, de modo que las escombreras se consideran construcciones de especial importancia al poder producirse efectos catastróficos ante movimientos sísmicos.

En particular, se debe considerar la NSCE-94 como de obligado cumplimiento. Según dicha Norma, para obtener una información sísmica suficiente para cada problema que permita estimar el grado de peligrosidad

Análisis de estabilidad de escombreras

de cada zona, se pueden utilizar tres criterios de evaluación: mapa de peligrosidad sísmica, aceleración sísmica de cálculo y espectro elástico de respuesta.

S Mapa de peligrosidad sísmica

La peligrosidad sísmica del territorio nacional se define por medio del mapa de peligrosidad sísmica de la Fig. 6.31. En dicho mapa se pueden obtener los valores de la aceleración sísmica básica en función del valor de la gravedad, a_b , y el coeficiente de contribución, K, para cada punto del territorio nacional.

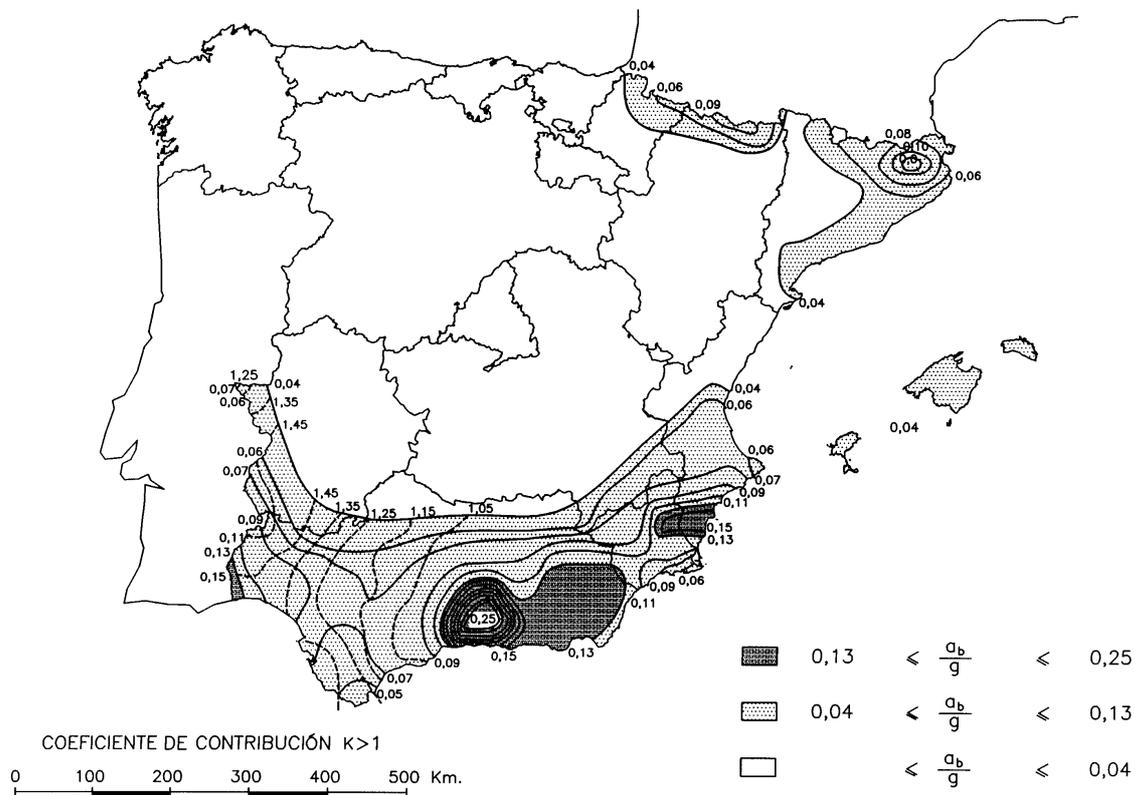


Figura 6.31. Mapa de peligrosidad sísmica (NCSE-94, 1998).

La aceleración sísmica básica es un valor característico de la aceleración horizontal de un terreno llano y firme, y corresponde a un período de retorno de 500 años. Por otro lado, el coeficiente de distribución considera el efecto que tiene, sobre cada población, la sismicidad asociada a la falla Azores-Gibraltar. Se debe tener en cuenta que este coeficiente no es de uso obligatorio en el caso específico de presas.

S Aceleración sísmica de cálculo

La aceleración sísmica de cálculo, a_c , se define con la siguiente expresión:

$$a_c = 8 \cdot a_b$$

donde:

a_b = Aceleración sísmica básica.

ρ = Coeficiente adimensional de riesgo, con el valor siguiente:

$$\rho = 8 \left(\frac{t}{50} \right)^{0,37}$$

siendo:

t = Período de vida, en años.

Para construcciones de especial importancia, y a efectos de cálculo, el período de vida se puede estimar en 100 años, por lo que el coeficiente de riesgo tomará un valor general de 1,30. Con este resultado, se cumple el objetivo de que la probabilidad de que la aceleración sísmica de cálculo sea sobrepasada es menor de 10^{-3} por año.

Se debe tener en cuenta que cuando la aceleración sísmica de cálculo es inferior a $0,06 \cdot g$, no será obligatoria la aplicación de esta Norma.

S Espectro elástico de respuesta

La Norma establece un espectro elástico para movimientos horizontales correspondiente a un oscilador lineal simple con un amortiguamiento de referencia del 5 % respecto al crítico, Fig. 6.32, que consta de tres tramos definidos por las siguientes ordenadas espectrales:

Tramo de períodos bajos ($T < T_0$):

$$S(T) = 1,0 + \left[\frac{S(T_0)}{1,0} - 1,0 \right] \cdot \frac{T}{T_0}$$

Tramos de períodos intermedios ($T_0 \leq T \leq T_1$):

$$S(T) = S(T_0)$$

Tramo de períodos altos ($T > T_1$):

$$S(T) = S(T_0) \cdot \frac{T_1}{T}$$

donde:

$$S(T_0) = (3 \cdot C / 3,8) \cdot (K / 1,25) + 2,30$$

$$T_0 = 0,125 \cdot C + 0,2 \cdot K / 0,175$$

$$T_1 = \frac{0,125 \cdot K \cdot (5 \cdot C / 1)}{S(T_0)}$$

Análisis de estabilidad de escombreras

siendo:

T = Período considerado, en segundos.

C = Coeficiente de suelo dependiente de las características del terreno.

K = Coeficiente de contribución.

Para otros amortiguamientos, D:

$$\sim f_i \left(\frac{D}{5} \right)^{0,4}$$

ACELERACIÓN ESPECTRAL/
SÍSMICA DE CÁLCULO (a/a_c)

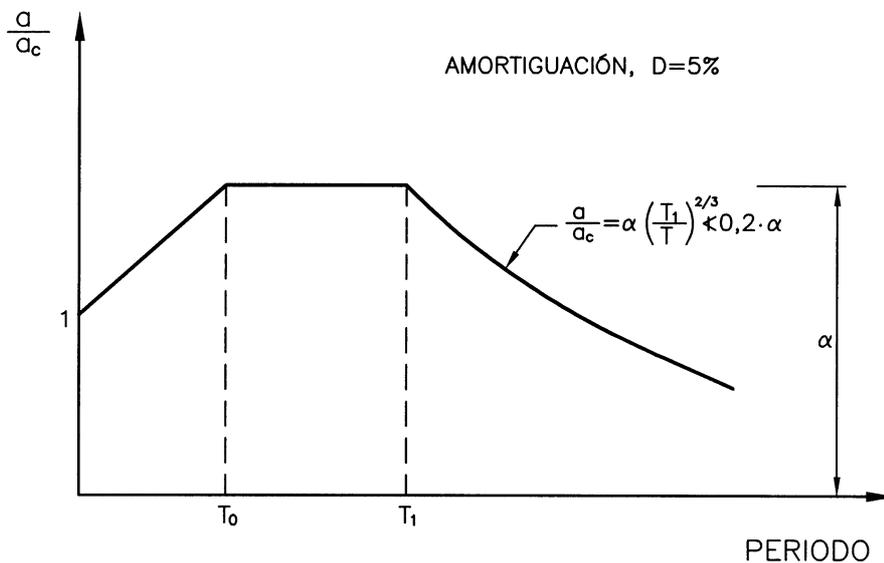


Figura 6.32. Espectro de respuesta (CNEGP, 1999).

Para conocer el coeficiente de suelo, C, se debe partir de la clasificación de los terrenos en los siguientes tipos:

- S *Terreno tipo I:* Roca compacta, suelo cementado o granular muy denso. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales $V_s > 750$ m/s.
- S *Terreno tipo II:* Terrenos granulares o cohesivos de compactación media a dura. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales $750 \text{ m/s} \sim V_s > 400$ m/s.
- S *Terreno tipo III:* Suelo granular suelto a medio, o suelo cohesivo medio a blando. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales $V_s \leq 400$ m/s.

El coeficiente de suelo, C, se obtiene de la Tabla 6.13 en función del tipo de terreno existente en una profundidad no menor de 30 metros.

TABLA 6.13. Coeficiente de suelo.

TIPO DE TERRENO	COEFICIENTE C
Tipo I	1,0
Tipo II	1,4
Tipo III	1,8

Fuente: Norma NCSE-94.

En la Tabla 6.14 se podrán hallar los valores de T_0 , T_1 y $\alpha(T_0)$ para valores seleccionados de los coeficientes C y K.

TABLA 6.14. Valores significativos de distintos espectros de respuesta.

	C	K					
		1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
T_0	1,0	0,15	0,17	0,19	0,21	0,23	0,25
	1,4	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30
	1,8	0,25	0,27	0,29	0,31	0,31	0,35
T_1	1,0	0,34	0,39	0,44	0,50	0,55	0,61
	1,4	0,59	0,63	0,68	0,72	0,77	0,81
	1,8	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96
(T_0)	1,0	2,50	2,42	2,34	2,26	2,18	2,10
	1,4	2,20	2,24	2,28	2,32	2,36	2,40
	1,8	1,90	2,06	2,22	2,38	2,54	2,70

Fuente: Norma NCSE-94.

En caso de ser necesario la consideración de movimientos verticales, se adoptará un espectro elástico de respuesta cuyas ordenadas espectrales sean el 70 % de los valores correspondientes a las del espectro para movimientos horizontales.

4. El fenómeno de la licuefacción

Uno de los temas más importantes relacionados con el análisis dinámico es el efecto de la licuefacción del terreno y sus consecuencias. La licuefacción se puede definir como el fenómeno en el que se producen grandes deformaciones y movimientos como resultado de alteraciones en las propiedades de suelos saturados y cohesivos. Este efecto es debido a un incremento en la presión intersticial que provoca una pérdida total o parcial de la resistencia al corte, haciendo que la masa de suelo adquiera las propiedades de un líquido y se comporte como tal. Tanto la rotura en flujo como la rotura de deformación son formas de licuefacción.

Los fenómenos que se producen como resultado de la licuefacción son los siguientes:

- S Ebullición del suelo al producirse una ascensión de agua hasta la superficie debido a la elevada presión intersticial, que puede ir acompañada de partículas del propio suelo.

Análisis de estabilidad de escombreras

- S Roturas en flujo del talud de la escombrera debido a la reducción de la resistencia del suelo.
- S Expansiones laterales que provocan pendientes más suaves.
- S Oscilación de bloques de suelo sobre una capa licuada que causa fisuras en el mismo.
- S Pérdida de capacidad de carga al reducirse la resistencia al corte.
- S Elevación de construcciones subterráneas, como tanques o tuberías.
- S Asentamientos de terreno.
- S Roturas de muros de contención.

Los terrenos con mayor susceptibilidad a la licuefacción son las arenas saturadas, las arenas limosas y las arenas gravosas. En la Fig. 6.33 se muestra la susceptibilidad de los residuos mineros dependiendo del tamaño de grano de los mismos. En general, la susceptibilidad a la licuefacción de los residuos mineros es mayor que la de los suelos naturales, posiblemente debido a su uniformidad de tamaños y reciente deposición, ya que la resistencia a la licuefacción aumenta con el tiempo.

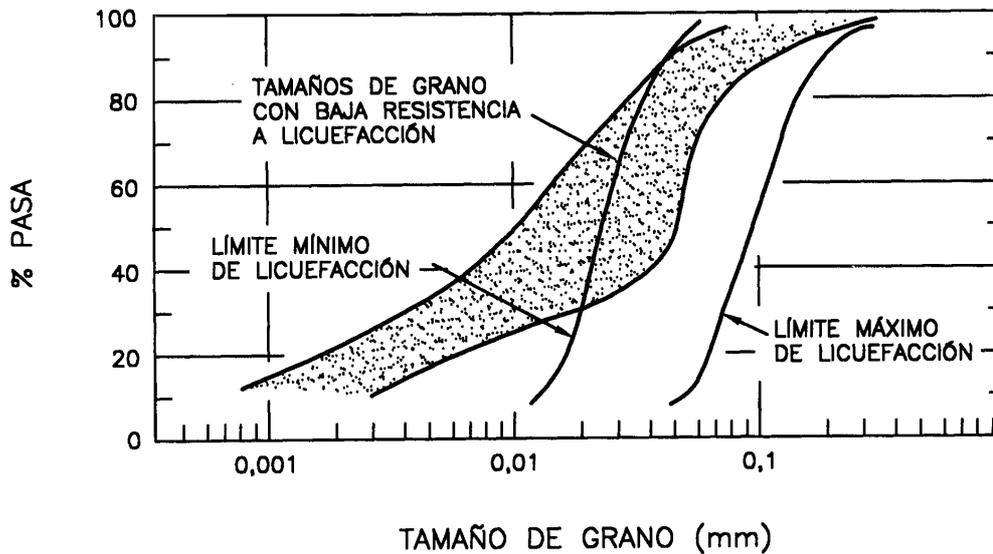


Figura 6.33. Tamaños de grano de residuos mineros con baja resistencia a la licuefacción (Ishihara, 1985).

A partir de diversos ensayos en laboratorio e investigaciones realizadas para explicar el fenómeno de la licuefacción, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- S La carga cíclica produce la densificación de los suelos granulares secos debido al reagrupamiento de partículas. Si el suelo está saturado y no se permite el drenaje durante las cargas, la tendencia a la disminución de volumen se compensa con el aumento de la presión intersticial y la consecuente disminución en los esfuerzos efectivos, como se aprecia en la Fig. 6.34. Si, en dicha figura, se supone un suelo en el punto A sujeto a cargas cíclicas y que podría desarrollarse hasta el punto B en condiciones normales, en este caso se mueve hasta el punto C donde la tensión total se representa por σ'_f y Δu . La presión intersticial aumentará gradualmente con el número de ciclos, produciéndose una licuefacción inicial (tensión efectiva nula) en el caso en que dicha presión iguale la tensión total.

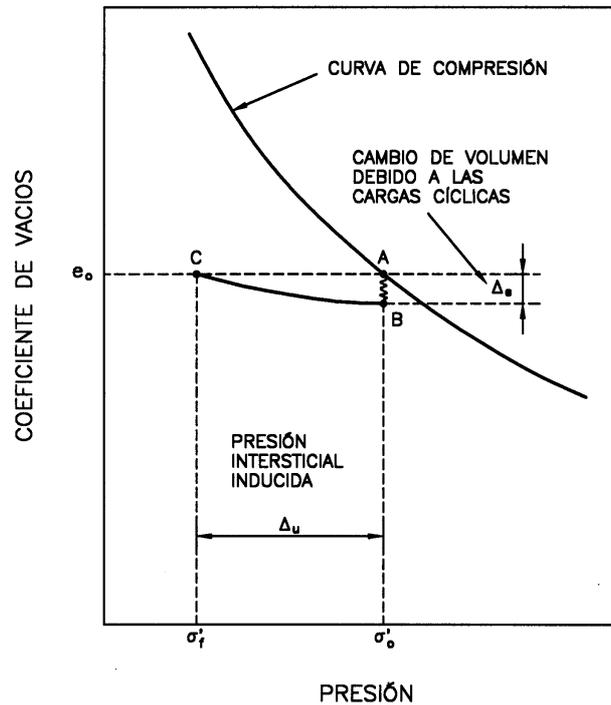


Figura 6.34. Mecanismos de generación de presión intersticial (Seed & Idriss, 1982).

- S El número de ciclos necesarios para conseguir que la tensión efectiva sea nula depende de la densidad relativa y de la magnitud de los ciclos.
- S La trayectoria tensional seguida por el suelo en los ciclos afecta al potencial de licuefacción.
- S Los suelos licuados conservan una resistencia residual incluso cuando se alcanza $\sigma' = 0$ en un ciclo, ya que, cuando éste acaba, aún se mantiene cierta resistencia al corte.
- S Las condiciones tensionales *in situ* también afectan al potencial de licuefacción. Por ejemplo, la presencia de una resistencia al corte inicial hace aumentar la proporción del esfuerzo cíclico necesario para incrementar la presión intersticial, en comparación a cuando dicha resistencia al corte no aparece. Por lo tanto, las peores condiciones se producen en terrenos saturados horizontales o casi horizontales.

Con respecto a la evaluación del potencial de licuefacción de terrenos horizontales, el método más simple es el creado por Seed (1983) basado en la comparación de las características de depósitos naturales con las condiciones de estabilidad o licuefacción producidas en un terremoto. La caracterización del depósito se realiza a partir del valor N obtenido en el ensayo SPT (*Standard Penetration Test*) corregido para la profundidad estimada según la expresión:

$$N_1 \text{ fi } C_N \cdot N$$

donde:

N_1 = Resistencia a la penetración modificada.

Análisis de estabilidad de escombreras

- C_N = Factor de corrección hallado en la Fig. 6.35.
- N = Valor del SPT. Para profundidades entre 0-3 metros, se multiplicará por 0,75.

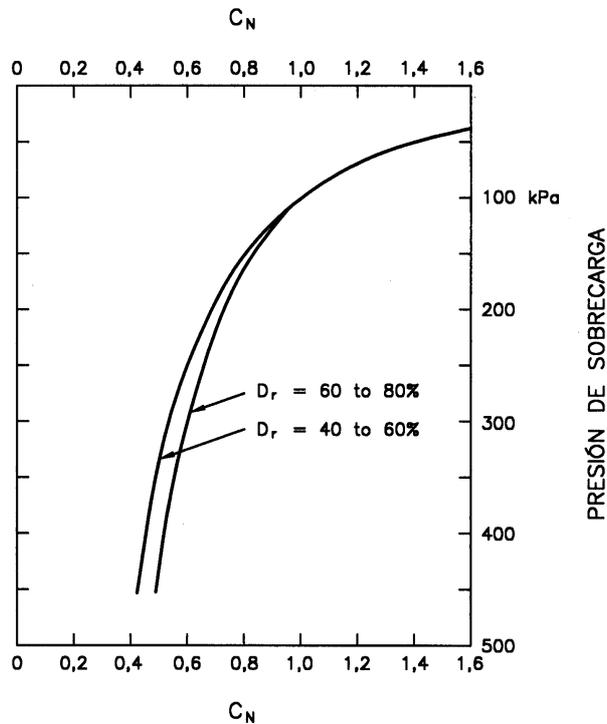


Figura 6.35. Gráfico para la obtención del factor de corrección C_N (Seed & Alba, 1986).

A continuación se deben realizar los siguientes pasos:

- S Estimación de la aceleración máxima superficial inducida por un terremoto, a_{max} .
- S Estimación de la tensión cortante media de pico, τ_{av} :

$$\frac{\tau_{av}}{\sigma'_0} \text{ fi } 0,653 a_{max} \cdot \left(\frac{\sigma'_0 \cdot r_d}{\sigma'_0 \cdot g} \right)$$

donde:

- σ'_0 = Tensión efectiva de sobrecarga a la profundidad considerada.
- σ_0 = Tensión total de sobrecarga a la misma profundidad.
- r_d = Factor de reducción, con valor 1 en la superficie y 0,9 a 11 metros.
- g = Aceleración de la gravedad.

Para cualquier valor de a_{max} y N_1 la posibilidad de producirse la licuefacción puede ser comparada con aquellos casos en los que realmente se ha producido. A partir de procesos de licuefacción acaecidos como consecuencia de terremotos de magnitud M y usando un factor de escala, se elabora el gráfico de la Fig. 6.36

que depende de los valores de N_1 y τ_{av} / σ_0 . Este gráfico es aplicable a arenas limpias con $d_{50} > 0,25$ mm, mientras que para materiales limosos N_1 debe ser multiplicado por 7,5 antes de entrar en el gráfico.

Estas relaciones se pueden utilizar para obtener un factor de seguridad, F, expresado por:

$$F = \frac{\text{Tensión uniforme necesaria para producir una licuefacción inicial en } x \text{ ciclos}}{\text{Tensión cortante media inducida por un terreno en } x \text{ ciclos}}$$

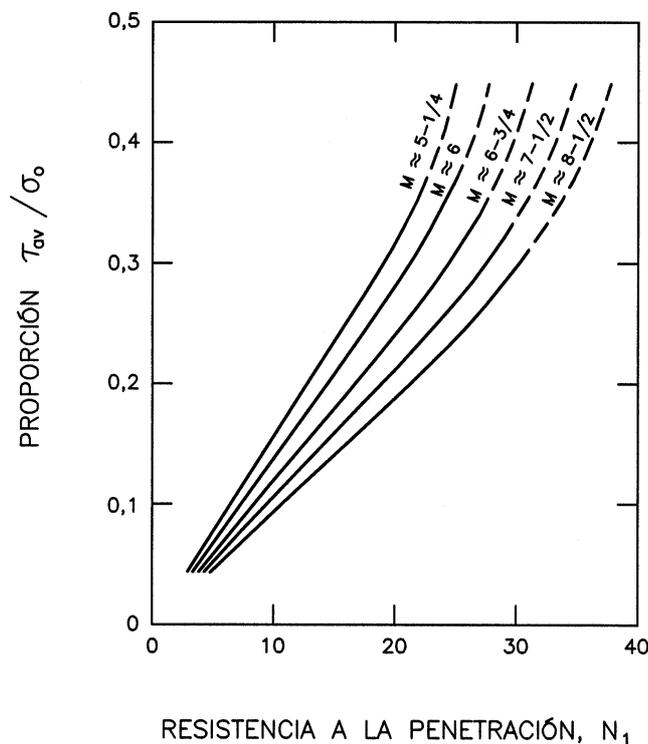


Figura 6.36. Gráfico para la evaluación del potencial de licuefacción para distintas magnitudes de terremotos (Seed et al., 1983).

6.7. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Las dos interpretaciones posibles de los resultados de los análisis de estabilidad son: a partir de la evaluación del factor de seguridad y a partir de la probabilidad de rotura.

A. Factor de seguridad

El cálculo del factor de seguridad de un talud es el método clásico para evaluar su estabilidad. En el equilibrio límite, el factor de seguridad se define como la proporción entre la resistencia al corte de la superficie de rotura más crítica y la resistencia al corte presente en dicha superficie. La definición del factor de seguridad puede variar dependiendo del método de análisis, aunque, normalmente, son comparables.

Análisis de estabilidad de escombreras

Para determinar el factor de seguridad más apropiado a cada caso, se deben considerar varios factores como:

- S Grado de incertidumbre de los parámetros de resistencia al corte.
- S Variabilidad en la composición del material.
- S Variabilidad en las condiciones de cimentación y en su geometría.
- S Comparación entre corto y largo plazo.
- S Consecuencias de la rotura.
- S Tipo de técnica de análisis utilizada.
- S Importancia del control en campo durante la fase de operación de la escombrera.

Muchos de estos factores son subjetivos, específicos de cada lugar o no pueden determinarse con fiabilidad. Por lo tanto, no se deben establecer criterios específicos del factor de seguridad para todos los casos. La selección de un diseño razonable del factor de seguridad se debe basar en juicios ingenieriles, con ciertas consideraciones en los casos en los que las suposiciones realizadas no sean ciertas.

El rango de valores del factor de seguridad varía desde 1 para condiciones transitorias, como terremotos o donde las consecuencias de la rotura no sean graves, a mayores de 2 para escombreras situadas en suelos problemáticos o donde las consecuencias de la rotura sean severas. En la estabilidad de la superficie de la escombrera, donde los materiales se mantienen con su ángulo de reposo, el factor de seguridad considerado suele ser de 1 para roturas superficiales.

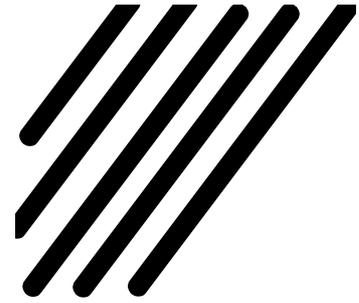
B. Probabilidad de rotura

Los análisis probabilísticos se basan en que los parámetros críticos en el análisis de estabilidad están sujetos a modificaciones, y que dicha variabilidad puede ser modelada por técnicas estadísticas. La incertidumbre en los valores de los parámetros críticos puede traducirse en variaciones en el factor de seguridad, que también puede ser modelado estadísticamente. La probabilidad de que el factor de seguridad sea menor que 1 será una medida estadística de la posibilidad de inestabilidad del talud.

Los métodos probabilísticos requieren un mayor conocimiento de la estabilidad y del proceso de diseño. En la mayoría de los casos, la información necesaria relativa a la variabilidad de las propiedades de los materiales no está disponible, por lo que la aplicación de estos métodos al diseño de escombreras no ha tenido mucho éxito, si bien se suelen ajustar adecuadamente a estudios económicos.

6.1. INTRODUCCIÓN	6-1
6.2. FACTORES QUE AFECTAN A LA ESTABILIDAD	6-1
6.3. CLASIFICACIÓN DEL GRADO DE ESTABILIDAD DE LAS ESCOMBRERAS. INDICE INESTEC	6-3
6.4.1. Seguridad de personas y equipos	6-9
6.4.2. Riesgo en instalaciones	6-10
6.4.3. Riesgo medioambiental	6-10
6.5. TIPOS DE ROTURA DE ESCOMBRERAS	6-10
6.5.1. Rotura de borde	6-15
6.5.2. Rotura planar	6-15
6.5.3. Rotura rotacional	6-15
6.5.4. Rotura en flujo	6-15
6.6. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD	6-16
6.6.1. Análisis de estabilidad de roturas circulares mediante gráficos	6-17
6.6.1.1. Gráficos de Taylor	6-20
6.6.1.2. Gráficos de Bishop y Morgenstern	6-26
6.6.1.3. Gráficos de Spencer	6-26
6.6.1.4. Gráficos de Janbu	6-29
6.6.1.5. Gráficos de Hoek y Bray	6-29
6.6.1.6. Gráficos de Huang	6-31
6.6.1.7. Gráficos de Cousins	6-35
6.6.2. Método del equilibrio límite (M.E.L.)	6-38
6.6.2.1. Método de Fellenius	6-41
6.6.2.2. Método de Bishop simplificado	6-42
6.6.2.3. Método de Janbu	6-43
6.6.2.4. Método de Bishop completo	6-44
6.6.2.5. Método de Spencer	6-44
6.6.2.6. Método de Morgenstern-Price	6-46
6.6.2.7. Análisis de estabilidad de roturas planares: método de las cuñas	6-46
6.6.3. Método de elementos finitos (M.E.F.)	6-54
6.6.4. Métodos tridimensionales	6-55
6.6.5. Cálculo dinámico	6-57
6.7. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD	6-73

capítulo 7



AUSCULTACIÓN DE ESCOMBRERAS

7.1. INTRODUCCIÓN

Existen una serie de factores propios de las escombreras que, generalmente, hacen necesario añadir a la observación visual otros sistemas de auscultación de los movimientos que experimentan. Estos factores son los siguientes:

1. Altura de los frentes de vertido.
2. Cimentaciones en terrenos con pendientes pronunciadas.
3. Estériles vertidos de baja resistencia al corte.
4. Bajos factores de seguridad frente a la rotura.
5. Historial de inestabilidades o roturas.

Durante la construcción de una escombrera tienen lugar deformaciones provocadas por variaciones en las tensiones totales y en las presiones intersticiales, como consecuencia de las filtraciones, así como de otros efectos secundarios. Los movimientos en la cimentación también determinan las deformaciones. Estas deformaciones pueden provocar el asentamiento del material o un desplazamiento por cizalladura según una superficie de rotura. Al contrario que el desplazamiento por cizalladura, el asentamiento del material de vertido no implica necesariamente la rotura del talud.

La observación de las deformaciones de las escombreras se lleva a cabo por las siguientes razones:

- S Seguridad del personal y de los equipos.
- S Comprensión y predicción del comportamiento de las escombreras.
- S Obtención de información para modificar diseños de escombreras actuales y futuras.

Las roturas de las escombreras suelen ir precedidas de señales de alarma como son el aumento del ritmo de deformación, la aparición de discontinuidades de deformación, fracturas en la plataforma o incremento en

Auscultación de escombreras

la presión intersticial en la escombrera o en la cimentación. Estas señales pueden también presentarse mucho antes de que la rotura sea inminente.

Los cambios significativos en los ritmos de deformación y la evaluación de sus posibles causas y consecuencias se estiman siguiendo los pasos que se indican a continuación:

- S Instalación de instrumentos para medir deformaciones y presiones intersticiales durante y después de la construcción.
- S Realización de observaciones periódicas, dependiendo del ritmo de desplazamiento y de la actividad constructiva que se lleve a cabo.
- S Sistematización y evaluación de los datos.
- S Registro de las posibles desviaciones.

7.2. SIGNIFICADO DE LA AUSCULTACIÓN

La necesidad de conseguir unas condiciones de seguridad adecuadas resulta obvia para cualquier operador. Sin embargo, los requerimientos técnicos que implica la verificación del diseño no están tan asumidos. De esta forma, indicar a un operario la existencia de una zona que él mismo puede percibir como de seguridad comprometida será mucho más efectivo que comunicarle los datos técnicos de instrumentos que hagan presagiar una rotura inminente, aun pudiendo ser ésta más grave que la anterior.

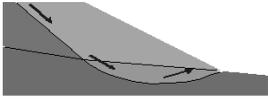
Del mismo modo, las observaciones visuales del equipo humano que pasa la mayor parte de su jornada en la escombrera pueden ser muy útiles si se sabe lo que se está buscando.

En la Tabla 7.1 se muestran los conocimientos mínimos que debe tener dicho equipo acerca de los tipos de rotura más frecuentes y de los signos que permiten diagnosticarlos.

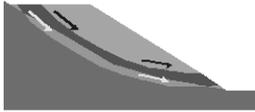
TABLA 7.1. Tipos de rotura, causas probables y señales de peligro.

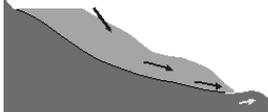
TIPO DE ROTURA	ROTURA DE BORDE
ESQUEMA	
CAUSAS PROBABLES	Cresta con pendiente excesiva debido al alto contenido de finos, ritmo rápido de vertido, material húmedo
EFFECTOS	Rotura de la cresta a pequeña escala, hundimiento de la cresta de vertido
SIGNOS DE PELIGRO	Agrietamiento de la cresta, hundimientos cerca de la cresta, talud pendiente bajo la cresta, aumento en el gradiente de desplazamientos de la cresta

Auscultación de escombreras

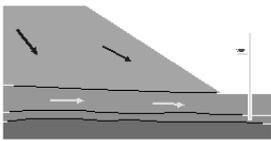
TIPO DE ROTURA	ROTURA DEL CIMIENTO
ESQUEMA	
CAUSAS PROBABLES	Material débil en el cimiento, ritmo de descarga rápido, alta presión intersticial en el cimiento, efectos de los terremotos o de las voladuras
EFFECTOS	Pueden causar grandes roturas afectando a partes importantes de la escombrera
SIGNOS DE PELIGRO	Filtraciones en el pie, abombamiento o deformación externa del pie de la escombrera, grietas por detrás de la cresta de la escombrera

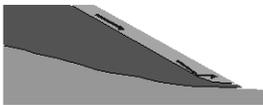
TIPO DE ROTURA	ROTURA DE GLOBAL
ESQUEMA	
CAUSAS PROBABLES	Material débil a lo largo de toda la base de la escombrera (e.g. capa de suelo), drenaje deficiente en la base de apoyo, cimiento muy pendiente, ritmo de vertido alto
EFFECTOS	La rotura de la escombrera por la base afecta a todo el conjunto de la escombrera
SIGNOS DE PELIGRO	Grietas en la plataforma de la escombrera en las proximidades del contacto con el terreno, hundimiento general de toda la plataforma

TIPO DE ROTURA	ROTURAS ROTACIONALES
ESQUEMA	
CAUSAS PROBABLES	Material débil en la escombrera o cimiento, altas presiones intersticiales, rápidos ritmos de descarga. Pueden afectar sólo al material vertido o incluir al cimiento. Pueden tener configuración circular o no circular
EFFECTOS	Pueden causar roturas que afecten a una gran parte de la escombrera. Pueden afectar sólo al material vertido o incluso al cimiento (se ilustran dos tipos de roturas típicas)
SIGNOS DE PELIGRO	Abombamiento en el pie, agrietamiento y hundimiento por detrás de la cresta, ruido de rocas, posibles escarpes por detrás de la cresta

TIPO DE ROTURA	ROTURA DE PIE
ESQUEMA	
CAUSAS PROBABLES	Materiales del cimiento débiles en el pie, altas presiones intersticiales en el pie, taludes escarpados en el pie, ritmos de vertido altos
EFFECTOS	Pérdida de capacidad portante en el pie, pudiendo permitir la propagación de la rotura del talud
SIGNOS DE PELIGRO	Deformación amplia del pie, desplazamiento y abombamiento del terreno del cimiento y/o material vertido en el pie

Auscultación de escombreras

TIPO DE ROTURA	LICUEFACCIÓN DEL CIMIENTO
ESQUEMA	
CAUSAS PROBABLES	Materiales limosos a arenosos en el cimiento, posiblemente confinados por acuitardos, presiones intersticiales debidas al rápido ritmo de descarga. Fuerzas sísmicas muy importantes
EFFECTOS	Posible rotura a gran escala con distancias de corrimiento importantes. Puede tener lugar en escombreras con cimiento de pendiente suave
SIGNOS DE PELIGRO	Presiones piezométricas en el cimiento elevadas. En algunos casos, pueden aparecer ebulliciones de cresta antes de la rotura

TIPO DE ROTURA	ROTURA PLANAR
ESQUEMA	
CAUSAS PROBABLES	Plano de debilidad en el material vertido, aproximadamente paralelo al frente de vertido, debido a la mala calidad del material, capas de nieve o rápida carga
EFFECTOS	Puede afectar a un gran volumen de la escombrera con grandes distancias de corrimiento
SIGNOS DE PELIGRO	Depresión de la cresta de la escombrera, abombamiento del pie, grietas en la plataforma por detrás de la cresta

7.3. INSPECCIONES VISUALES

Las inspecciones visuales son de importancia crítica para mantener una operación segura en la escombrera. Existen una serie de indicadores visuales que pueden reflejar problemas en una escombrera:

- ° Agrietamiento superficial excesivo.
- ° Nivel o cota de las bermas no constante.
- ° Necesidad de efectuar refuerzos superficiales.
- ° Abombamiento del talud de la escombrera.
- ° Deslizamiento del pie o de la cimentación.

Estas inspecciones deben implementarse durante la construcción de la escombrera y relacionarlas con las lecturas de los instrumentos.

La inspección visual es el medio más empleado y, generalmente, el más práctico para la vigilancia de las escombreras. Todo el equipo técnico, así como los maquinistas y operadores de la escombrera, deben estar adiestrados en la identificación de señales de inestabilidad y también visitar y permanecer en la escombrera durante suficiente tiempo.

En la Fig. 7.1 se muestra la instalación de un extensómetro para la medida del movimiento de la cresta del talud. Este instrumento está formado por dos equipos de medida provistos de poleas, un punto fijo, un peso y un cable ligero y duradero.

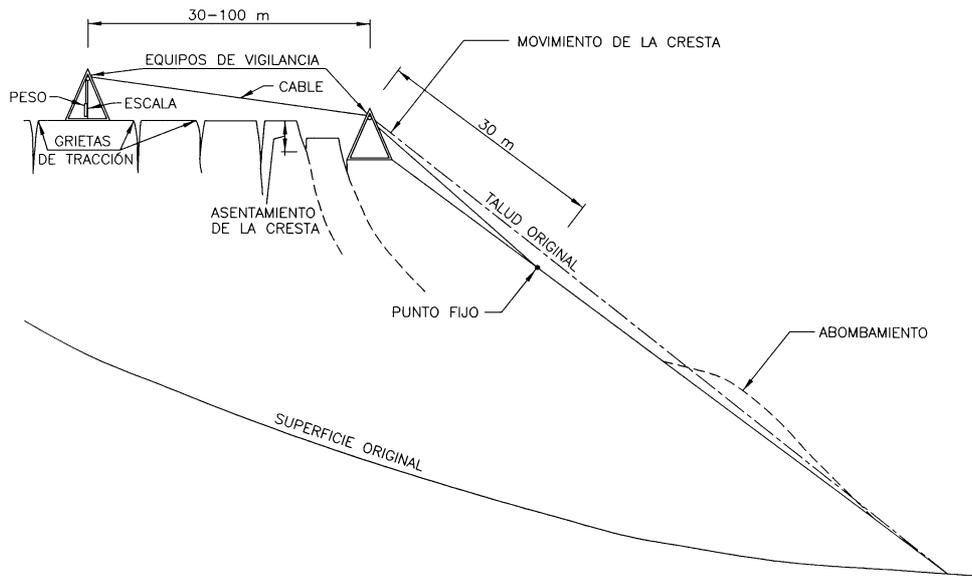


Figura 7.1. Esquema de la vigilancia realizada en una escombrera (Nichols, R.S., 1982).

7.3.1. Cresta de la escombrera

Las inspecciones visuales regulares de la cresta de la escombrera permiten detectar signos precoces de inestabilidad, como pueden ser:

- ° Rocas sueltas o pequeños derrumbamientos producidos durante el asentamiento del material.
- ° Grietas cuyo tamaño depende de la importancia de los movimientos de subsidencia. Precisamente es en estas grietas donde más conviene instalar la instrumentación. Todas las grietas existentes deben rellenarse para conseguir unos caminos de acceso adecuados hasta la cresta de la escombrera y para evitar, además, la infiltración de aguas superficiales. Los conductores de los volquetes y los maquinistas de los tractores deben permanecer atentos a estas grietas y comunicar su aparición a los encargados.
- ° Ligera concavidad superficial del talud. Esta concavidad puede deberse al abombamiento de la base o a la inclinación excesiva o sobrependiente en la cresta de la escombrera.
- ° Sobrependiente del talud bajo la cresta de la escombrera. Generalmente se debe a la acumulación de materiales finos cerca de la cresta. Estos materiales suelen acumularse con un ángulo superior al de reposo, lo que les hace susceptibles de ocasionar un deslizamiento, llegando incluso a afectar a la propia cresta.

7.3.2. Talud de la escombrera

Los abombamientos producidos en la cresta, el centro o el pie de la escombrera, durante el asentamiento del material, son señales de inestabilidad. El abombamiento de la cresta o del centro se deben a la sobrependiente del talud más allá de su ángulo de reposo normal. Puede aparecer como consecuencia de la insuficiente segregación del material, por un ritmo de carga excesivo o por la presencia de zonas de

Auscultación de escombreras

material saturado. No será un problema de importancia si, a medida que se continúe depositando material, se va alcanzando el ángulo de reposo adecuado en el talud. Por el contrario, cuando la sobrependiente persiste, una gran zona de la cresta puede verse afectada. En ese caso, la deposición de material debe detenerse hasta que el movimiento del talud cese.

El abombamiento del pie de la escombrera es síntoma de un asentamiento a gran escala. De hecho, las roturas de escombreras suelen ir precedidas de abombamientos del pie, pero no todos los abombamientos del pie desembocan en la rotura de la escombrera. Si se vigila la construcción del pie, se deben examinar los resultados de las observaciones cuidadosamente. Si no se ha instrumentado el pie, se debe considerar su auscultación de inmediato. Cuando, según las lecturas de los instrumentos, el abombamiento no se detiene, debe interrumpirse el vertido, que podrá reanudarse, con cautela, una vez que los instrumentos indiquen que la deformación se ha completado.

7.3.3. Cimentación de la escombrera

Muchas roturas de escombreras a gran escala están provocadas por la rotura de los materiales de los cimientos. Estos fallos se pueden detectar por la elevación de los materiales de cimentación por delante del pie de la escombrera, lo cual puede inspeccionarse regularmente.

7.3.4. Auscultación acústica

A veces se pueden oír ruidos procedentes del pie del talud en algunas escombreras construidas con materiales gruesos. Estos *ruidos de roca* suelen preceder a la rotura de la estructura. El ruido puede ir aumentando de nivel y frecuencia durante horas e incluso días antes de la rotura. El ruido probablemente se debe a la fracturación de materiales de baja resistencia y al rozamiento lento entre las superficies de las rocas más competentes. La detección de estos ruidos sirve para reubicar los trabajos de vertido hasta que se haya restablecido el equilibrio.

7.4. MÉTODO OBSERVACIONAL

Frecuentemente se construyen escombreras usando el Método Observacional. En muchos casos, se abusa del método, no se entiende, o no se lleva a cabo completamente. Es útil, por consiguiente, repasar el *Método Observacional* originalmente definido por Terzaghi y discutido por Peck, (1969). El Método Observacional se adapta bien a los proyectos mineros donde es un elemento necesario de las economías de desarrollo tener en cuenta el riesgo. Se recomienda que el Método Observacional se use explícitamente en la construcción de escombreras.

Las etapas básicas del Método Observacional para el diseño y construcción de escombreras consisten en:

- S Empezar investigaciones suficientes en campo y en gabinete para establecer las condiciones de partida y diseño para la escombrera. Evaluar el caso probable y el más desfavorable, y la respuesta de la escombrera a estas condiciones (Fase de Diseño).

Diseño básico para la respuesta más probable considerado el sistema de evaluación de la Guía de Diseño

y Construcción de Escombreras. El Método Observacional es el más útil como una manera de manejar incertidumbres (Fase de Diseño).

- S Definir y seleccionar las magnitudes, mediciones y frecuencias a ser tomadas en los procedimientos de construcción. Calcular o predecir los valores anticipados de los parámetros a auscultar bajo las condiciones más probables y bajo las más desfavorables. Estos límites de auscultación forman la base para la prevención, para parar los movimientos, o para cambiar el diseño cuando se está procediendo a la construcción (Fase de Diseño).
- S Seleccionar un método de mitigación o respuesta para cada desviación significativa previsible de los parámetros auscultados respecto de los previstos, basándose en la hipótesis del comportamiento. Estas soluciones pueden ser ajustes para el vertido, bermas, desagües, etc., que deben definirse de antemano. No pueden dejarse para la fase operacional, aunque las condiciones de campo reales siempre harán pensar en modificaciones a las contestaciones inicialmente concebidas (ambas en la Fase de Diseño y la Fase Operacional).
- S Crear un sistema de auscultación que permita una observación clara y oportuna de los parámetros seleccionados (Fase de Diseño y Fase Operacional).
- S Proceder con la construcción. Hay que tener en cuenta que un sistema apropiado no sólo consiste en tomar datos del lugar sino que hay que actuar sobre él. Esto requiere una cooperación íntima entre el equipo de ingeniería geotécnica, el de minería y el de construcción. Debe haber un compromiso de la dirección para asegurar que el proceso está siendo llevado a cabo y es respetado por todos aquellos involucrados.
- S Cuando se han recogido los datos de auscultación y la construcción prosigue, hay que usar dichos datos para controlar la proporción de vertidos y evaluar el diseño global, modificar los métodos de vertido, diseñar el apropiado y reevaluar los métodos de auscultación.

Hay que tener en cuenta que ciertos aspectos del Método Observacional son esenciales para su aplicación correcta:

- a) Una retroalimentación desde el diseño a la auscultación/evaluación y vuelta al diseño.
- b) Los métodos de corrección que se formulan en el momento de diseño para cada circunstancia desfavorable. Estos procedimientos pueden modificarse después al procederse a la construcción.
- c) Supervisión de los datos requeridos para evaluar las condiciones en el campo y que se usan para controlar las modificaciones en el vertido o para diseñar.

La selección y aplicación de instrumentación de auscultación forman una parte de la aplicación del Método Observacional para el diseño y construcción de escombreras.

7.5. APLICABILIDAD DE LOS MÉTODOS DE AUSCULTACIÓN

Los métodos de auscultación se encuentran dentro de alguna de las categorías siguientes:

Auscultación de escombreras

- a) Instrumentación actualmente aplicable, métodos y software. Esto incluye aquellos que están listos para ser aplicados, así como instrumentación que puede requerir alguna modificación o adaptación al aplicarse a una escombrera. Los sistemas presentan variaciones desde el muy simple y barato a sistemas innovadores que sólo serían aplicables a ciertas escombreras
- b) Métodos aplicados en otros campos que tienen aplicación directa a la auscultación de escombreras.
- c) Áreas de investigación actual que parecen prometedoras, pero que no están actualmente disponibles (debido a razones técnicas, económicas o prácticas) para la aplicación de auscultación de escombreras.
- d) Áreas que en la actualidad parecen estar en "punto muerto" aplicables a la auscultación de escombreras. También están incluidas en esta categoría los métodos que pueden tener aplicabilidad muy limitada.

Hay que destacar que algunos de los métodos de las categorías anteriores sólo son aplicables para auscultar algunas situaciones de las escombreras. En concreto, no hay ni un método de auscultación, incluidos los métodos actualmente en uso, que sea generalmente aplicable a todas las situaciones de auscultación de las escombreras. La razón principal es que los diversos métodos son sensibles a los distintos tipos de movimiento (diferentes vectores de movimiento) creando variados modelos de movimiento.

7.6. TIPOS DE ROTURA

Los tipos de rotura típicos se recogen en la Tabla 7.1, donde también se muestran las características de la deformación típicas para los distintos tipos de rotura. En muchos casos, el modelo de deformación proporciona valiosa información con respecto a los posibles modos de rotura que deben ser considerados.

Hay que destacar que la deformación de una escombrera no indica necesariamente rotura. Todas las escombreras se crean en un estado inicial que está relativamente suelto. Después del vertido, el material de la escombrera sufre una consolidación, ya que las partículas rotan o se rompen encajándose unas con otras. (Se usa aquí el término *consolidación* en el sentido geológico y no implica la aplicación de esfuerzos de compactación externos).

Basándose en observaciones de campo, el movimiento vertical total para una escombrera alta puede ser de hasta más de 2 m. El movimiento predominantemente vertical también puede ser acompañado por una pequeña tensión lateral, aunque las medidas de movimiento lateral dentro del cuerpo de la escombrera estén aún desarrollándose.

Según Seed (1975), podría esperarse que rocas de grano grueso depositadas en una escombrera sufran asentamientos del orden del 5 %. Debido a la forma en la que se construyen las escombreras, con una superficie inclinada, se supone que muchos asentamientos ocurren antes de que la escombrera esté construida hasta su altura final en cualquier sección vertical particular. No obstante, la observación de grietas en las superficies de escombreras pueden ser debidas a movimientos verticales apreciables y que no se relacionan con la rotura.

Elevados movimientos de asentamiento verticales suponen problemas para el uso de muchos equipos convencionales geotécnicos, ya que se instalan en orificios creados a través del material de la escombrera, por lo que se torcerían o romperían con el tiempo. En la Tabla 7.2 se indica la susceptibilidad de diferentes tipos de instrumentación al movimiento del diferencial.

Auscultación de escombreras

TABLA 7.2. Características de la instrumentación utilizada en auscultación de escombreras.

CLASIFICACIÓN	INSTRUMENTO	FUNDAMENTO	VENTAJAS E INCONVENIENTES	PRECISIÓN	DIRECCIÓN DE MÁXIMA SENSIBILIDAD	USO ACTUAL	COMENTARIOS
Instrumentos instalados en la cresta del talud	Extensómetro de cables	Extensómetro temporal soportado por un trípode, con un extremo del cable anclado al talud de la escombrera y el otro unido a un dispositivo de registro.	<ul style="list-style-type: none"> - Fácil montaje - Bajo coste - Sujeto a interferencias por las condiciones climáticas - Sólo se obtiene una parte del movimiento de la escombrera - Adecuado en movimientos laterales de la cresta, pero no para desprendimientos. 	De 2 a 5 mm	Paralelo a la dirección del cable	Habitualmente utilizado	<ul style="list-style-type: none"> - Método más habitualmente utilizado - Adecuado para el reconocimiento de posibles problemas - Debe ser combinado con otros sistemas en situaciones críticas.
	Extensómetros enterrados	Sustitución del extensómetro de cables por el enterrado.	<ul style="list-style-type: none"> - Más caro que el anterior. - Menos susceptible a las condiciones climáticas - Dificultades para medir los desprendimientos. 	Mayor que una fracción de mm	Movimientos horizontales o paralelos al extensómetro	Ocasionalmente utilizado	<ul style="list-style-type: none"> - Utilizado para la vigilancia de pendientes - Debe combinarse con métodos de vigilancia vertical - Aparición de problemas de obstrucción.
	Medidor de asentamientos	Variedad de métodos para medir los asentamientos de la cresta del talud.	<ul style="list-style-type: none"> - Medición de movimientos verticales - El coste es variable según la técnica utilizada - Algunos sistemas son capaces de realizar una vigilancia a distancia. 	Pocos mm dependiendo del sistema	Movimiento vertical	Ocasionalmente utilizado	<ul style="list-style-type: none"> - Muy útil en combinación con los dos métodos anteriores por su sensibilidad vertical - Gran variedad de tecnologías aplicables.
	EDM	Combinado con un teodolito señala todos los movimientos posibles.	<ul style="list-style-type: none"> - Muy utilizado a cielo abierto - Su uso en escombreras depende de las líneas de visión - Su uso en mina no permite la adquisición de datos. 	Pocos mm	Cualquier vector de movimiento	Ocasionalmente utilizado	<ul style="list-style-type: none"> - Se recomienda su uso ya que proporciona el vector total del movimiento - Muestra que los sistemas automatizados pueden llegar a ser aplicables.
	GPS	Localización de sensores en una superficie reciben señales temporales por satélite.	<ul style="list-style-type: none"> - Muy utilizados para la vigilancia de presas - Uso futuro para medir el vector total del movimiento - Los costes van disminuyendo. 	5 mm	Cualquier vector de movimiento	Escaso desarrollo	<ul style="list-style-type: none"> - La tecnología del futuro.
	Inclinómetro de superficie	Sistema habitual para la medida de cambios de inclinación de la superficie. Pueden ser permanentes y ser leídos con instrumentos portátiles.	<ul style="list-style-type: none"> - Sólo mide inclinaciones - El coste varía según el sistema utilizado - Algunos sistemas se pueden controlar a distancia. 	Pocos segundos de arco	Sólo rotación	Ocasionalmente utilizado	<ul style="list-style-type: none"> - Se debe considerar como un método adecuado para controlar el mecanismo de rotura - Para el mecanismo aplicado, es muy sensible y barato - En muchos casos, es más aplicable a rotura en roca que en escombreras.

Auscultación de escombreras

Instrumentos instalados dentro de la escombrera	Inclinómetro fijo (en sondeo)	Similar al anterior pero instalado en un sondeo que puede ser recubierto. También se puede usar con sensores electrolíticos o fibra óptica.	<ul style="list-style-type: none"> - Elevado coste - Posible control remoto - Muy sensible a movimientos de cizalla - Requiere un sondeo. 	Pocos segundos de arco	En sentido del corte	No usado	S Normalmente no se aplica a escombreras excepto en casos de licuefacción.
	Inclinómetro encapsulado	Ubicado en una tubería dentro del sondeo. El ángulo de la tubería se mide con una sonda. También se pueden usar con sensores electrolíticos a fibra óptica.	<ul style="list-style-type: none"> S Método adecuado para la vigilancia de taludes de suelos y rocas S Alta sensibilidad S Requiere un sondeo S Su uso se limita donde la deformación total sea pequeña. 	1-2 mm	En sentido del corte	No usado	S Recomendado sólo para aplicaciones especiales donde se necesite una gran sensibilidad.
	Péndulo invertido Sondeo de medida	Ambos métodos requieren de un sondeo en la escombrera. El tamaño del instrumento depende del diámetro del sondeo.	<ul style="list-style-type: none"> S No suele ser aplicable a escombreras debido al tamaño necesario del sondeo. 	1-2 mm		No utilizado	S No recomendable en la mayoría de las aplicaciones.
	Células de carga	Existen dos posibles técnicas: mediante el uso de un sondeo o utilizando un gato plano de carga.	<ul style="list-style-type: none"> S Necesita un conocimiento de las condiciones de tensión. S Muy útil para relacionar los esfuerzos totales con la presión intersticial. 	Pocos psi	Esfuerzos perpendiculares al plano de la célula	Ocasionalmente utilizado	<ul style="list-style-type: none"> S Recomendable para tareas de investigación S Puede utilizarse junto con piezómetros para determinar la presión intersticial.
	Acelerómetro	Medida de la aceleración o vibración.	<ul style="list-style-type: none"> S Uso restringido a vigilancia sísmica. 	N/A	Vibración	Ocasionalmente utilizado	S Recomendable en casos donde se necesite vigilancia sísmica.
	Piezómetro Standpipe	Medida de la presión intersticial.	<ul style="list-style-type: none"> S Baja sensibilidad y bajo tiempo de respuesta S Permite tomar muestras de agua para su análisis. 	Variable	N/A	Ocasionalmente utilizado	S No recomendable excepto en arena, grava o estériles muy permeables.
	Piezómetros neumáticos o eléctricos	Medida de la presión intersticial en un punto.	<ul style="list-style-type: none"> S Medida de la presión intersticial que aporta datos sobre la estabilidad de la escombrera S El coste está relacionado con la instalación S Algunos equipos necesitan un sondeo. 	Pocos psi	N/A	Ocasionalmente utilizado	S Recomendable en la mayoría de las escombreras.
	Piezómetros múltiples	Medida de la presión intersticial en diferentes puntos de un sondeo.	<ul style="list-style-type: none"> S Interpretación de la presión intersticial S Requiere un sondeo. 	Pocos psi	N/A	Raramente utilizado	S Debe ser utilizado donde se tenga un conocimiento de las condiciones del agua.
	Medidor de asentamientos en sondeos	Existe una gran variedad de tecnologías disponibles.	<ul style="list-style-type: none"> S Requiere un sondeo S Genera movimientos verticales de la escombrera. 		Vertical	No utilizado	S Probablemente el movimiento de la escombrera destruiría el equipo, por lo que no es recomendable.
Topografía	EDM	Medida electrónica de distancias.			XYZ	Frecuentemente utilizado	

Auscultación de escombreras

	GPS	Sistema de posicionamiento global.			XYZ	Actualmente no utilizado	
	Medidor de alturas	Medida convencional de alturas.			Vertical	Utilizado	S Conocimiento de la topografía de la cresta del talud. Puede ser combinado con extensómetros-
	Fotogrametría	Medida estereoscópica en sentido vertical u oblicuo.	S No muy adecuado para tareas de vigilancia.	Escasos cm	XYZ	Ocasionalmente utilizado	
	Videometría	Cálculo automatizado de las coordenadas XYZ de diversos puntos del talud mediante imágenes de video.	S Tecnología en desarrollo S Proporciona todo tipo de movimientos S No funciona a escasa visibilidad.		XYZ	No utilizado	S Existe una tecnología semejante con cámaras Láser-
	Cámara Láser	Semejante al caso anterior excepto en el tipo de cámara utilizada.	S No suele tener suficiente alcance.		XYZ	No utilizado	S Tecnología en desarrollo.
Otros	Emisión acústica	Control de fenómenos microsísmicos causados por roturas de partículas dentro de la escombrera.	S Tecnología muy simple S Puede realizarse un control remoto S Se instalan geófonos en la superficie del talud S Los instrumentos pueden ser baratos, dependiendo del grado de sofisticación.	Proporciona información cualitativa más que específica	N/A	No utilizado	S Ha sido utilizado para predecir zonas de rotura en materiales duros.
	Emisión EM	Control de la emisión electromagnética causada por la fractura y cambio en la resistencia de las partículas de una zona de rotura.	S Puede ser insensible al movimiento en escombreras.		N/A	No utilizado	S Ha sido utilizado para predecir terremotos S Todavía está en fase de desarrollo.

Auscultación de escombreras

Los movimientos de la escombrera pueden ocurrir por varias razones, incluidas las siguientes:

- a) Asentamiento del material de la escombrera con el tiempo, como ya se ha comentado anteriormente. Esto normalmente provocaría desplazamientos de cizalladura mínimos, aunque pueden aparecer grietas de tracción en la superficie del depósito, particularmente sobre los cambios abruptos en la topografía del terreno original.
- b) La consolidación de suelos subyacentes, particularmente la turba y los depósitos lacustres.
- c) Movimientos de cizalladura dentro de la escombrera. La mayoría de las escombreras sufren algún movimiento de cizalladura y una razón importante para auscultar es impedir que los pequeños movimientos de cizalladura se puedan acelerar para volverse intensos e incontrolados (rotura).

Una clave para la interpretación correcta de los resultados de auscultación es la separación de los movimientos de asentamiento de los movimientos de cizalladura, que son el resultado de inestabilidad dentro de la escombrera. No hay ninguna regla infalible para evaluarlo, aunque el análisis de los vectores de movimiento proporciona una información útil.

7.7. PROBLEMAS HABITUALES EN LA AUSCULTACIÓN DE ESCOMBRERAS

A continuación se tratan los principales problemas que se pueden encontrar en la auscultación de escombreras.

Los problemas relativos al nivel de auscultación son los siguientes:

- S **Recopilación de datos del ritmo de movimiento vs. cantidad de movimiento:** el extensómetro de cables (en trípode) es el más frecuentemente usado en la auscultación para el registro de datos de la velocidad más que de los movimientos totales. Mientras el extensómetro de cable es una parte muy útil del equipo, deben reconocerse los inconvenientes de los datos de velocidad comparados con los datos de movimientos totales que deberían ser obtenidos. Los inconvenientes incluyen la dificultad de extrapolar el momento de rotura, la falta de reconocimiento de ciertas tensiones elevadas relacionadas con las formas de rotura y el registro completo del movimiento de la escombrera. Un inconveniente mayor del sistema es la variación de lectura con la dirección del vector de movimiento.
- S **Variación de las lecturas dependiendo de la dirección del vector de movimiento comparada con la orientación del cable:** si, como es frecuente, el vector de movimiento de la escombrera no es paralelo al cable, no se medirá el vector de movimiento completo. La proporción del vector realmente medido puede variar de 0 % a 100 % en situaciones comunes. También pueden determinarse velocidades de movimiento muy diferentes en situaciones casi idénticas del extensómetro de cables, dependiendo de la localización relativa de éste con la superficie de cizalladura.
- S **Falta de datos internos de la escombrera:** el estado de la escombrera está normalmente determinado por la observación de su superficie. El estado interior del depósito, normalmente, se desconoce. Los datos útiles podrían incluir los modelos de la deformación, presiones intersticiales y de cimentación, condiciones de tensión y las características de los materiales.

- S **Falta de tecnología adecuada para perforar en las escombreras:** las técnicas disponibles para perforar no suelen ser satisfactorias en materiales tan sueltos e inconsistentes como los estériles de una escombrera. De aquí que, generalmente, aun existiendo alguna instrumentación disponible que podría ser usada, no se instale dentro de las escombreras.
- S **Perturbación de las estaciones de auscultación de la superficie:** muchos de los métodos de auscultación de superficie sufren la perturbación de los puntos de referencia en la cara de la escombrera. La perturbación se relaciona con la actividad en la escombrera, caídas/deslizamientos de rocas y vandalismo.
- S **Necesidad de mover los puntos de auscultación de la superficie o la instrumentación:** como resultado de las actividades a desarrollar en la superficie de la escombrera, hay una necesidad de trasladar frecuentemente la instrumentación de la superficie, como por ejemplo los extensómetros de cables, lo que produce un registro discontinuo de movimientos, no obteniéndose el movimiento total del depósito a lo largo del tiempo.
- S **Lecturas al azar o incluso ausencia de lecturas de los equipos de auscultación durante los periodos de fiestas, etc., o después del cierre de las minas.**
- S **Adquisición/transmisión de los datos e interpretación:** el elevado coste de la mano de obra indica que hay una necesidad por automatizar la adquisición de datos de las estaciones de auscultación. La tendencia en este campo de la ingeniería es considerar la adquisición de los datos por control remoto y la transmisión a una estación de proceso central. La interpretación continua de los datos se percibe como un requisito para cubrir con volúmenes grandes de datos obtenidos por sistemas automáticos. El comportamiento real de la escombrera puede así relacionarse con un modelo previsto a ajustar éste en caso de desviaciones importantes.

7.8. SELECCIÓN DE LOS MÉTODOS DE AUSCULTACIÓN

7.8.1. Introducción

En general, este apartado trata la selección de la instrumentación de auscultación a usar en las escombreras.

El planteamiento general y ejecución para llevar a cabo un programa de auscultación debería incluir las etapas que se describen a continuación (adaptado de Dunncliffe, 1989). La ejecución de un programa de auscultación debe formar parte del Método Observacional descrito anteriormente.

- a) Predicción del modo potencial de rotura a ser auscultado.
- b) Definición de los parámetros a auscultar y cuestiones que deben ser respondidas.
- c) Selección de la instrumentación y localización de las estaciones para resolver las cuestiones planteadas.
- d) Evaluación de los factores que pueden influir en medidas o pueden llevar a interpretaciones incorrectas. Hay que destacar el problema de la dirección del vector de movimiento poniendo especial atención a la sensibilidad del instrumento a ese vector de movimiento.

Auscultación de escombreras

- e) Preparar el presupuesto y el plan de instalación incluidas las especificaciones.
- f) Preparar la recogida de datos, procesamiento, interpretación y canales de comunicación.
- g) Instalación de la instrumentación.
- h) Calibración/chequeo de la instrumentación.
- i) Proceder con las medidas de auscultación y el resultado introducirlo en el Método Observacional. Esto incluye la interpretación de los resultados, valoración, y decisiones con respecto a las acciones requeridas.

7.8.2. Requisitos generales

A continuación se describen en la Tabla 7.3 los requisitos generales de los dos sistemas de instrumentación más ampliamente utilizados. Aunque en la tabla sólo se recogen algunos instrumentos de auscultación, el sistema también puede incluir equipos de lectura remotas, sistemas de adquisición de datos y otros sistemas. Los comentarios sobre la exactitud y las características técnicas relacionadas se aplican al sistema de auscultación globalmente, incluyendo cualquier dato del equipo de adquisición de datos o dispositivos de lectura.

7.8.3. Elección de la auscultación con relación a la clasificación de escombreras

La Tabla 7.4 resume una serie de recomendaciones referentes a los requerimientos de auscultación con relación a la clasificación de escombreras de la Guía de Diseño y Construcción de Escombreras. La auscultación más intensiva se recomienda para las clasificaciones más altas. En resumen, para las Clases III y IV, pueden exigirse auscultaciones adicionales para documentar cuestiones básicas de diseño, las cuales surgen de la naturaleza particular de la escombrera y sus requerimientos de diseño particulares.

Para las escombreras de las Clases III y IV, los tipos principales de instrumentación recomendados son los siguientes:

- a) Auscultación de movimientos: extensómetro de cables, extensómetro enterrado y asentamiento de la superficie. En el futuro, el GPS combinado con una línea de referencia instalada en la mina, será ampliamente utilizado y proporcionará muchas ventajas por encima de los sistemas actuales.
- b) Auscultación de rotación: inclinómetro de superficie para circunstancias especiales. El uso de inclinómetros de fondo de barreno no se recomienda generalmente, excepto en circunstancias especiales, como posibles cimentaciones que podrían provocar la rotura catastrófica con una tensión previa pequeña.
- c) Presión intersticial: es recomendable utilizar piezómetros para auscultar las presiones de poro en el material del cimientado y, en algunas circunstancias, en el material de vertido. Pueden ser de tipo neumático o eléctrico, dependiendo de las circunstancias.

Los desarrollos futuros aplicables a la auscultación de escombreras incluirán el uso del GPS. Otros sistemas como la videometría y la emisión acústica también pueden desarrollarse llegando a ser competitivos económicamente.

TABLA 7.3. Resumen de los requerimientos típicos para equipos de auscultación.

TIPO	CONCEPTO	ESPECIFICACIÓN	REQUERIMIENTO	COMENTARIOS
Movimiento	Precisión y repetibilidad	± 1 a 2 cm	Debido a los grandes movimientos provocados por los asentamientos, no se necesita que sean tan precisos como para la auscultación de movimientos en el control de estabilidad de taludes.	Algunas excepciones son aquellas en las que los movimientos antes de la rotura son muy pequeños. Por ejemplo, las roturas del cimientto en suelos colapsables.
	Estabilidad a largo plazo	Evolución < (precisión y repetibilidad).	La evolución a largo plazo puede conducir a conclusiones erróneas. En condiciones adversas por el ambiente minero puede ser difícil determinar la evolución.	La calibración puede ser chequeada con sistemas expertos como EDM o con sistemas internos como los extensómetros.
	Coste	Las minas requieren unos costes tan bajos como sea posible. Muchos sistemas no son reutilizables.	El gasto en instrumentación puede ser compensado con la reducción de costes debida al menor riesgo de roturas en la escombrera y a la reducción potencial en los costes de personal.	El coste es altamente sensible en muchas situaciones mineras.
Presiones intersticiales (Piezómetros)	Precisión y repetibilidad	$\pm 0,3$ m	Similar a auscultaciones convencionales en otras situaciones geotécnicas. El tiempo de respuesta corto es vital en muchas aplicaciones.	Es muy importante sellar el piezómetro en la formación y usar la técnica correcta para que la presión medida se corresponda con la presión de la formación. Muchos piezómetros no son instalados correctamente.
	Estabilidad a largo plazo	Evolución a largo plazo < 0,3 m	La evolución a largo plazo puede dar lugar a una evolución incorrecta de la estabilidad de la escombrera.	La evolución es diferente según el tipo de piezómetro.
	Coste	Tan bajo como sea posible. El mayor coste es el de instalación.	Veáanse comentarios acerca de la auscultación de movimientos.	El coste de la instrumentación es generalmente inferior si se compara con el coste de instalación. Muchos piezómetros sólo se pueden usar en una ocasión.

Auscultación de escombreras

TABLA 7.4. Recomendaciones para la auscultación en función del tipo de escombrera.

CLASIFICACIÓN	MEDIDA DEL MOVIMIENTO			MEDIDA DE PRESIÓN INTERSTICIAL			OTROS MÉTODOS DE MEDIDA		
	TIPO	COMENTARIOS	D/A	TIPO	COMENTARIOS	D/A	TIPO	COMENTARIOS	D/A
I		° Sólo vigilancia visual							
II	Extensómetro de cables	° La toma de datos es adecuada ° Ciertos problemas con la dirección del vector de movimiento	Sí	Piezómetro abierto	Uso no recomendable excepto en formaciones homogéneas y de alta permeabilidad	No			
	Extensómetro enterrado	° Se usa cuando las interferencias por el movimiento de camiones impiden el uso de los anteriores ° No proporciona el movimiento total	Sí	Piezómetro neumático	Se usan si existe razones de diseño relacionadas con el tipo de cemento	Sí			
	EDM	° Puede ser usado en su versión más sencilla	Quizá	Piezómetro eléctrico	Como en el caso anterior	Sí			
	Fotogrametría	° La frecuencia de lectura suele ser problemática							
III y IV	Extensómetro de cables	° Usado en vigilancia puntual de escombreras activas	Sí				Emisión acústica	Los sensores pueden instalarse detrás de la cara de avance	Si
	Extensómetro enterrado	° Adecuado para movimientos a largo plazo ° Sustituye a los anteriores en las zonas donde las actividades superficiales impidan la vigilancia	Sí	Piezómetro abierto	Recomendables excepto para conocer el nivel de saturación de los estériles y para obtener muestras	No	Emisión acústica	En fase experimental	

Auscultación de escombreras

	EDM	<ul style="list-style-type: none"> ° Frecuentemente utilizado 	Quizá	Piezómetro neumático	Recomendable para su instalación en el cimient o en los estériles	Quizá			
	Asentamiento superficial	<ul style="list-style-type: none"> ° Usados junto con extensómetros enterrados para la vigilancia de bloques 	Sí	Piezómetro eléctrico	Como en el caso anterior	Sí			
	Inclinómetro de superficie	<ul style="list-style-type: none"> ° Relativamente barato ° Muy sensible a movimientos de rotación 	Sí	Piezómetro multinivel	Útil cuando se necesiten varias tomas de muestra y medidas piezométricas a distintos niveles	Quizá			
	Inclinómetro en sondeo	<ul style="list-style-type: none"> ° Requiere de un sondeo en el estéril ° Útil en escombreras pequeñas ° Muy sensible a movimientos de cizalla 	No						
	Indicadores de zona de rotura	<ul style="list-style-type: none"> ° Requiere de un sondeo en el estéril ° Más barato y menos completo que el aparato anterior 	Sí						
	Indicadores de fibra óptica	<ul style="list-style-type: none"> ° Requiere de un sondeo en el estéril ° Similar al inclinómetro en sondeo pero con mayor capacidad para grandes deformaciones 	Sí						
	Fotogrametría	<ul style="list-style-type: none"> ° Baja frecuencia de lectura 	No						
	Videometría	<ul style="list-style-type: none"> ° Técnica en desarrollo 	Sí						
	GPS	<ul style="list-style-type: none"> ° Actualmente no es económico ° Sensibilidad de 5 mm 	Sí						

7.9. TECNOLOGÍA APLICABLE A LA AUSCULTACIÓN DE ESCOMBRERAS

7.9.1. Elección de la instrumentación según las necesidades de auscultación

La Tabla 7.2 resume la instrumentación aplicable para diferentes medidas en la auscultación de escombreras.

Esta tabla no proporciona recomendaciones en el uso de equipo de adquisición de datos para la lectura de la instrumentación instalada en las escombreras, aunque se tiene en cuenta la posibilidad de usar un sistema de instrumentación particular con la adquisición de datos.

Las ventajas de usar la adquisición de datos y/o la reducción remota incluyen lo siguiente:

- a) Reducción de los costes de personal, particularmente cuando el periodo de supervisión se incrementa al máximo auscultando las 24 horas. Como los requisitos de auscultación llegan a ser más exhaustivos en las escombreras con clasificaciones más altas, los beneficios potenciales y economías del coste de adquisición de datos automatizada llegan a ser más atractivos.
- b) Uniformidad en las lecturas.
- c) Posibilidad de auscultar más frecuentemente y examinar las lecturas en la oficina.
- d) Posibilidad de preparar alarmas automáticas y teléfonos que advierten si existen peligros.

Un posible inconveniente es que haya una menor auscultación visual de la escombrera, a menos que se tomen medidas específicas para asegurar que dicha auscultación es continuada.

7.9.2. Perforación

Actualmente, los resultados de diferentes estudios indican que la perforación en escombreras altas raramente se realiza debido a la dificultad y coste de la perforación. La dificultad principal es debida a la naturaleza del material en el depósito, que, a menudo, consiste en bloques de roca grandes y duros con relativamente grandes huecos o *poros* entre los bloques. Normalmente, la circulación del fluido se pierde con los métodos de perforación convencionales. Los bloques pueden tender a rodar o moverse durante la perforación, lo cual la complica aun más.

Si se pudieran perforar barrenos en la escombrera, en algún lateral o en la base, sería posible el uso de una amplia gama de instrumentación geotécnica convencional. En el futuro, es probable que la perforación en las escombreras sea más fácil debido al desarrollo de nuevas técnicas. En la Tabla 7.2 se detallan los diferentes tipos de instrumentación que requieren un barreno para su empleo.

Hay dos estrategias diferentes de perforación para la instalación de instrumentación debajo o en la base de una escombrera:

- a) Barreno direccional o inclinado perforado desde alguna posición adyacente al depósito.
- b) Perforación de un barreno vertical a través del material del depósito.

Basándose en la información presente, parece que las tecnologías más prometedoras usan elementos similares:

- a) Capacidad de perforar taladros con revestimiento o entubados por detrás de la broca.
- b) El uso del aire como fluido de perforación.
- c) El uso de brocas de percusión capaces de perforar o romper los bloques grandes de roca que pueden existir dentro de la escombrera.
- d) Para la instrumentación propuesta, es deseable tener permanentemente un barreno entubado. La instalación de instrumentación a través de la entubación y de la boca de perforación con la retirada final del revestimiento frecuentemente da lugar a diversos tipos de daños. Por esto, desde el punto de vista de instalación de la instrumentación, es preferible el empleo de sistemas que instalan un revestimiento y, a continuación, permiten la retirada de la sarta de perforación y la boca.

Los sistemas más prometedores son (no en orden de preferencia):

- a) Perforadora rotativa neumática modificada con un gran martillo de entubado (barrenos verticales). Este sistema tiene el inconveniente de intentar trabajar a través de la broca.
- b) Perforadora hidráulica rotativa con cabeza *Krupp dual* (barrenos verticales).
- c) Sistemas ODEX/ODS (barrenos verticales e inclinados).
- d) Perforadoras rotativas duales (barrenos verticales).
- e) Perforadora direccional *Navi-drill* (perforación direccional en el cemento fuera de los límites de la escombrera).

7.9.3. Movimientos

A continuación se revisan varios métodos disponibles aplicables a la auscultación del movimiento de la escombrera.

Otra serie de aparatos y la información correspondiente a los mismos queda recogida en la Tabla 7.3. Algunos de ellos incorporan tecnologías que parecen prometedoras para la auscultación en el futuro.

7.9.3.1. Extensómetros de cables

Los extensómetros son aparatos que se utilizan para medir la variación de distancia entre dos puntos, y pueden ser de lectura manual o encontrarse conectados a dispositivos de registro que proporcionan la representación de los movimientos con respecto al tiempo. Se pueden consultarse periódicamente por medio de un sistema de telemetría o equiparse con interruptores que se configuran para emitir una señal de alarma cuando se produce un movimiento de magnitud determinada.

Pueden ser equipos de cresta mecánicos o equipos montados sobre trípodes. Éste es el instrumento de auscultación más comúnmente usado en depósitos y, normalmente, se encuentra en cualquier escombrera

Auscultación de escombreras

de alta montaña. Las ventajas comprenden el bajo coste, montaje flexible y rápido, y la fácil instalación. Los inconvenientes incluyen sensibilidades diferentes a movimientos que depende de la localización del movimiento con relación a la posición, la dificultad de auscultar una situación durante el tiempo suficiente como para conseguir un registro de movimiento completo para la escombrera, y la perturbación de otras actividades en la escombrera.

Hay que tener en cuenta, además, que si el cable no está paralelo a la dirección de movimiento, los extensómetros leerán entre 0 % y 100 % del movimiento real del talud, dependiendo del modo de rotura. Si no se considera el modo de rotura y la dirección del movimiento relativo al cable, las lecturas del instrumento estarán potencialmente desviadas. La solución a este problema es entender los puntos débiles del instrumento y hacer con cuidado la interpretación de las lecturas. Como con cualquier instrumento, las lecturas pueden estar muy sesgadas si no se interpretan en el contexto adecuado, el cual incluye los diversos factores que pueden afectar a las lecturas. Se recomienda, en algunas situaciones, el uso adicional de técnicas de auscultación que pueden resolver algunos de estos problemas.

Para seleccionar el extensómetro adecuado se debe considerar la componente de movimiento que se va a medir en cada caso. Ésta se encuentra en la dirección del hilo entre el extremo que se desplaza y la primera polea. Dependiendo de la localización del instrumento, diferentes instalaciones pueden dar resultados distintos en el mismo talud. Los extensómetros más empleados en la mayor parte de trabajos de vigilancia de escombreras mineras suelen ser lo más simples posible. Esto permite que el encargado o un operario con un adiestramiento básico puedan ajustarlos y efectuar las lecturas. Se pueden observar diversas configuraciones de extensómetros de hilo de acero en las Figs. 7.2 a 7.5.

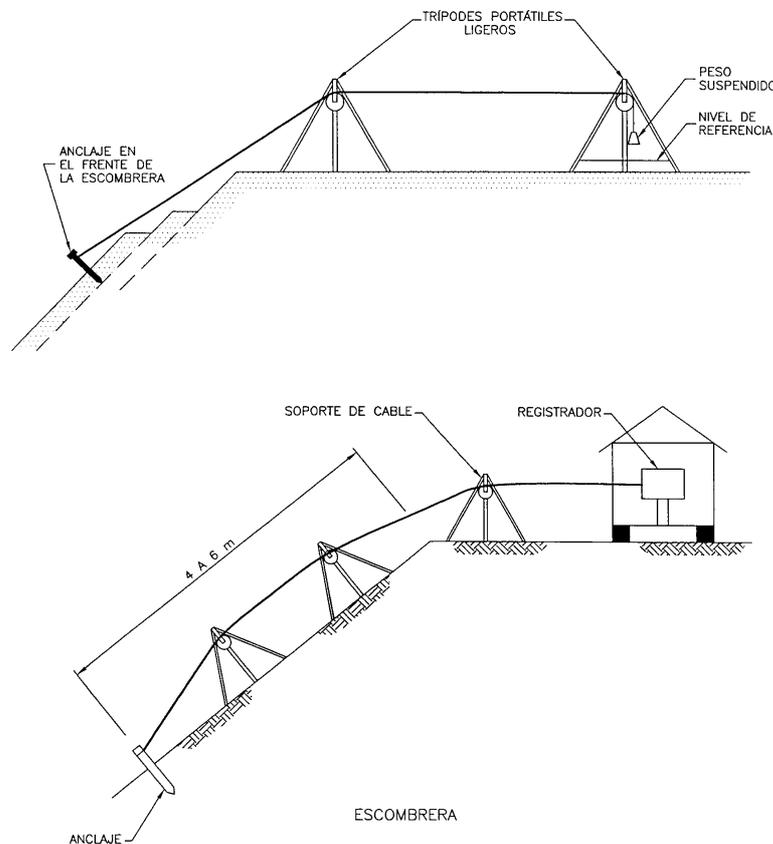


Figura 7.2. Extensómetro de cable de acero de un solo soporte.

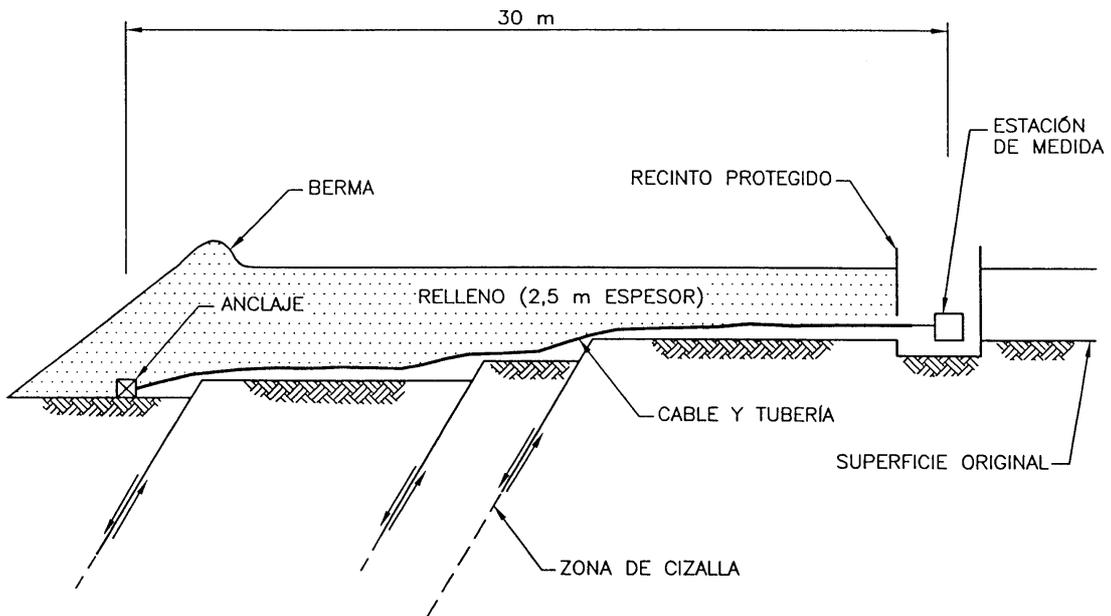


Figura 7.3. Extensómetro de cable de aceros de varios soportes. Se emplean para medir los desplazamientos de las superficies inclinadas de los taludes.

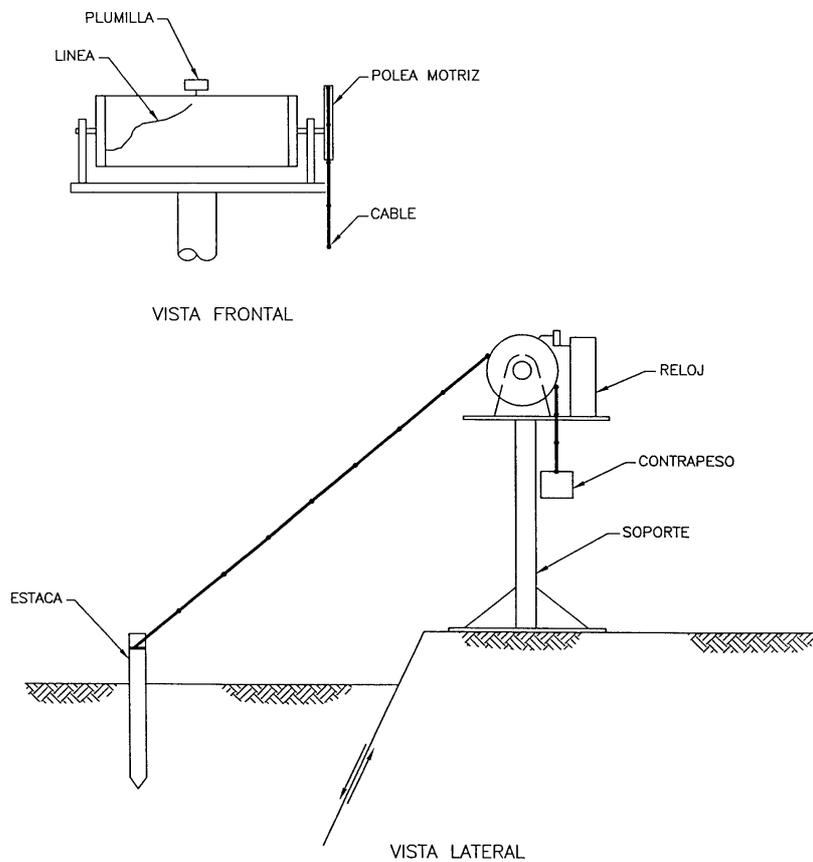


Figura 7.4. Extensómetro de cable de acero enterrado, con el equipo de medida en un extremo fijo.

Auscultación de escombreras

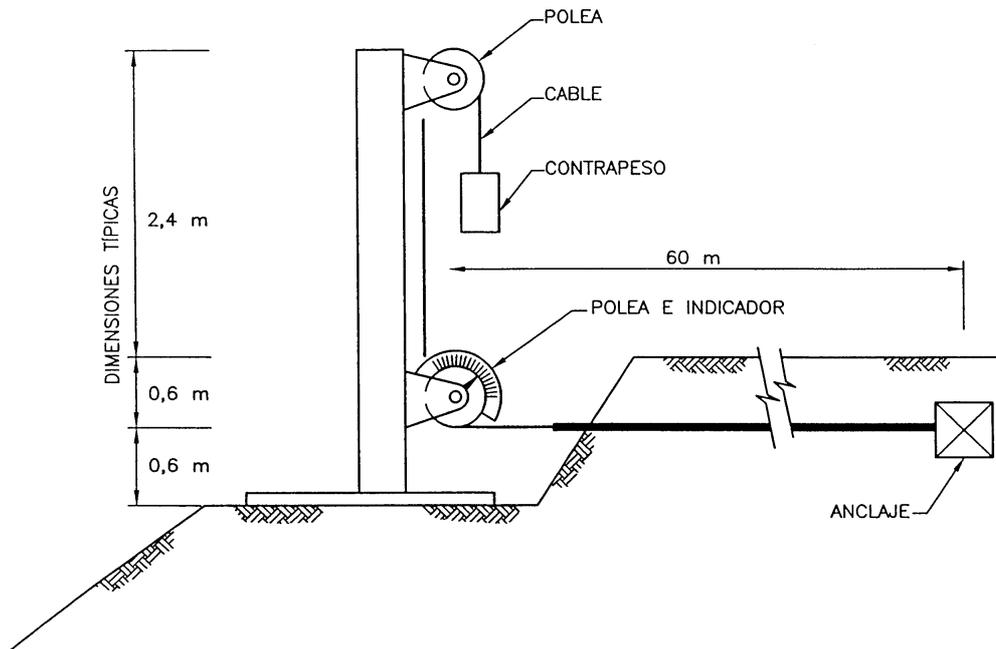


Figura 7.5. Extensómetro de cable de acero enterrado con el equipo de medida en el extremo móvil.

7.9.3.2. Extensómetros enterrados

Estos extensómetros pueden ser de tipo convencional flexible (enrollado) o equipos similares modificados para su uso en escombreras. Las ventajas principales incluyen la disponibilidad, el coste, la adaptabilidad a la adquisición de los datos y la perturbación limitada por actividades en la superficie de la escombrera. Los inconvenientes incluyen el hecho de que el instrumento sólo registra movimientos en una dirección paralela al instrumento (normalmente horizontal) y problemas potenciales con atascos en los bordes afilados. Los mismos problemas geométricos comentados anteriormente afectan a este instrumento.

7.9.3.3. Inclínómetros

Los inclinómetros se emplean, generalmente, para medir la componente horizontal de los movimientos que experimenta el depósito o el movimiento diferencial en el contacto con la cimentación. Su empleo es mucho menos frecuente que el de los extensómetros debido a su mayor coste, a su dificultad de instalación y a su corta vida dada la naturaleza dinámica de las escombreras mineras.

Actualmente se pueden distinguir dos tipos de inclinómetros: los fijos y los móviles.

7.9.3.4. Levantamiento topográfico

Existen varias técnicas de estudio de los desplazamientos asociados al movimiento de escombreras. Entre

otras se pueden citar el empleo del taquímetro convencional, la medida electrónica de distancias (*EDM*), siendo éste uno de los pocos métodos de *bajo coste* capaz de proporcionar el vector de movimiento completo y así superar uno de los mayores inconvenientes de los extensómetros o la fotogrametría.

Las inspecciones se emplean frecuentemente en las minas, ya que constituyen un método económico y eficaz para reunir datos de los movimientos verticales de asentamiento y totales. El mayor inconveniente de las inspecciones de reconocimiento se encuentra en su condición discontinua. Son necesarias mediciones frecuentes para definir adecuadamente tendencias a corto plazo. Además, este método de vigilancia de la cresta de una escombrera supone el mantenimiento de un equipo de inspección (por ejemplo, un equipo de topógrafos) y una interpretación posterior de los datos, lo que tiene como consecuencia un retraso que puede ser crítico cuando son necesarias actuaciones rápidas. Así, en los casos en los que el movimiento de la escombrera es rápido, se hace imposible el empleo de estos métodos.

La Tabla 7.2 recoge una lista de otras tecnologías de auscultación, algunas de las cuales son aplicables actualmente a la auscultación de escombreras y otras que pudieran ser empleadas en el futuro. Las tecnologías que podrán utilizarse en el futuro para la auscultación del movimiento de escombreras incluyen:

- a) GPS (Sistema de Posicionamiento Global, tecnología en vías de desarrollo que permite la determinación del vector de movimiento completo).
- b) Emisión acústica (EA, tecnología en vías de desarrollo).
- c) Auscultación electromagnética (tecnología en vías de desarrollo).
- d) Células de asentamiento (actualmente disponible). Permite auscultar el movimiento vertical, lo que resolvería algunos de los problemas potenciales de los extensómetros de cables.
- e) Inclínómetros de superficie (actualmente disponible). Aplicable sólo a la rotura rotacional.
- f) Videometría y cámaras láser (tecnología en vías de desarrollo que promete proporcionar un vector de movimiento tridimensional).

7.9.4. Presiones intersticiales del agua

Las presiones intersticiales son un factor sumamente importante que relaciona la incidencia de todas las formas de rotura por cizalladura en la escombrera. La presión del poro es, probablemente, el parámetro más importante para llegar a comprender los cambios en la estabilidad de una escombrera. En muchos casos, también sirve para entender la velocidad de movimiento como respuesta a la carga del material de la base por la escombrera. Puesto que las presiones intersticiales son extensamente moderadas en proyectos de ingeniería civil, existe una buena comprensión del problema y una amplia gama de instrumentación disponible.

Desgraciadamente, debido a la dificultad de poner piezómetros en la escombrera y material del cimientto, se miden sólo de vez en cuando presiones intersticiales en escombreras en operación. El apartado anterior sobre perforación hizo referencia a nuevas tecnologías de perforación que pueden simplificar la colocación de piezómetros en barrenos verticales a través de la escombrera o en barrenos direccionales o barrenos inclinados desde fuera de los límites del depósito. Sin embargo, debe indicarse que, en muchos casos, es

Auscultación de escombreras

deseable conocer la presión de poro cerca del pie de la escombrera, dentro del área en condiciones de carga de la escombrera.

Este área puede ser difícil de alcanzar con un barreno, pero puede satisfacer bien a instalaciones hechas delante del depósito como se verá más adelante.

Se pueden registrar datos muy útiles instalando piezómetros en el material de la base y construyendo la escombrera por encima de la situación del instrumento. Ésta puede ser la mejor manera de proporcionar datos del piezómetro dentro del área donde las condiciones de carga en la base están cambiando rápidamente. Las instalaciones dentro de este área proporcionan datos muy útiles sobre la presión intersticial, que pueden usarse para determinar las dimensiones de la escombrera aceptables para mantener la estabilidad. En estos casos, hay que proteger adecuadamente los piezómetros, normalmente abriendo zanjas combinadas con bermas de protección.

Los dispositivos que sirven para auscultar la presión intersticial pueden dividirse en dos categorías:

- a) Instrumentos que se sellan dentro de la formación y proporcionan la medida de la presión de poro en un punto definido (piezómetros), y
- b) Barrenos abiertos o pozos del tipo *standpipes* los cuales proporcionan la presión media en una considerable longitud del barreno. El uso de esta última instrumentación (i.e., dispositivos en barrenos abiertos) generalmente no se recomienda, ya que los resultados pueden estar distorsionados debido a las interconexiones entre las zonas de presión altas y bajas. Las únicas excepciones son los de tipo *standpipes* instalados en formaciones conocidas como homogéneas o para muestras de agua en formaciones homogéneas cercanas.

Los piezómetros que se emplean disponen de una amplia gama de tecnologías para medir la presión intersticial en una situación conocida y que se describirán a continuación, Figs. 7.6 a 7.9.

7.9.4.1. Piezómetros neumáticos

Estos instrumentos operan equilibrando la presión de gas proporcionada por un diafragma dentro de la punta del instrumento. Cuando se equilibra la presión de gas con la presión de agua, el caudal de gas comienza a aumentar o se restringe, dependiendo del diseño. Estos instrumentos son estables, relativamente baratos y trabajan bien en diferentes ambientes. Los inconvenientes incluyen la necesidad de cuidados para que las tensiones en el tubo no lo aplasten o rompan (lo que daría un aumento falso en la presión) y el hecho de que la integración con equipos de adquisición de datos es más difícil.

7.9.4.2. Piezómetros de resistencia eléctrica

Estos piezómetros emplean un diafragma que contiene elementos de medida de tensión convencionales que, leyendo la tensión inducida por la desviación del diafragma, proporcionan una lectura de la presión de agua que actúa en el lado exterior del diafragma. Los inconvenientes incluyen una baja estabilidad a largo plazo de algunos instrumentos, cierta dependencia en la longitud de carga (depende del diseño), y la necesidad de protección. Las ventajas incluyen un coste bajo y robustez de los instrumentos.

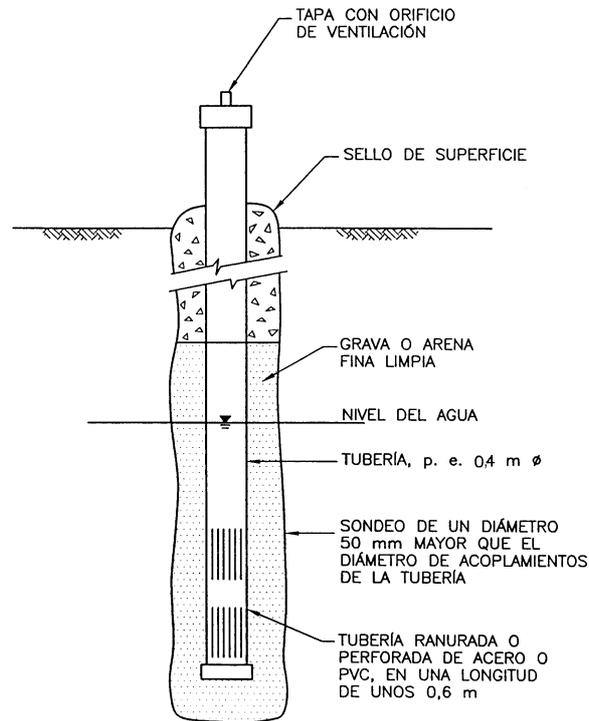


Figura 7.6. Pozo de observación.

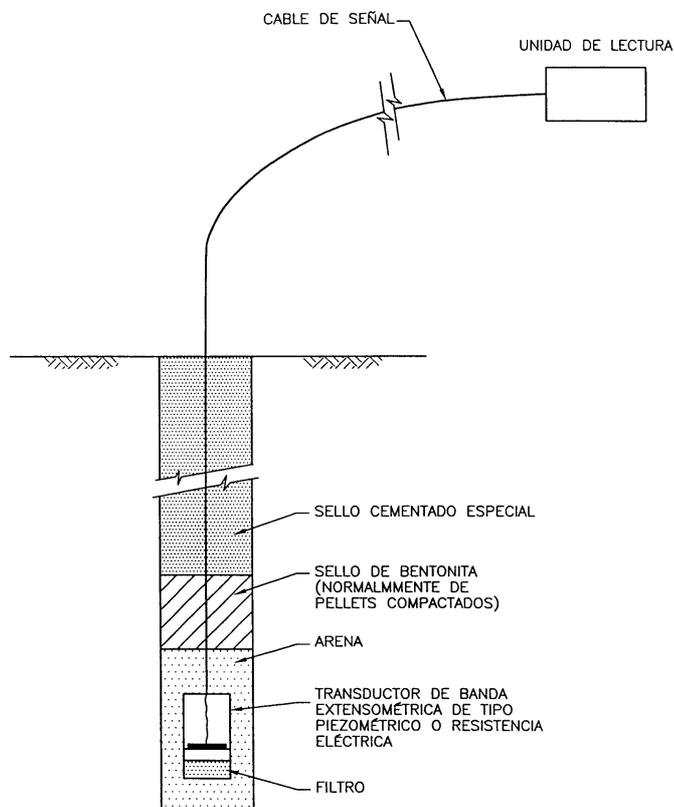


Figura 7.7. Piezómetro de galga extensométrica de resistencia eléctrica instalado en un sondeo.

Auscultación de escombreras

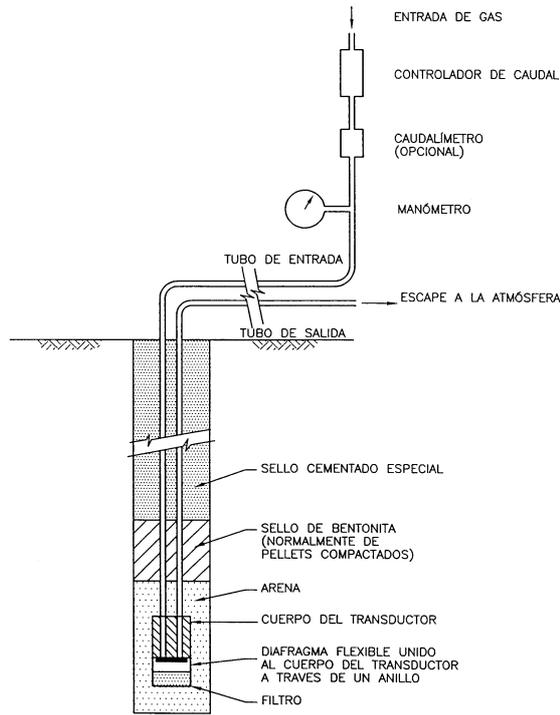


Figura 7.8. Piezómetro neumático instalado en un sondeo. Normalmente un transductor con dos tubos que lee el flujo de gas entre ambos.

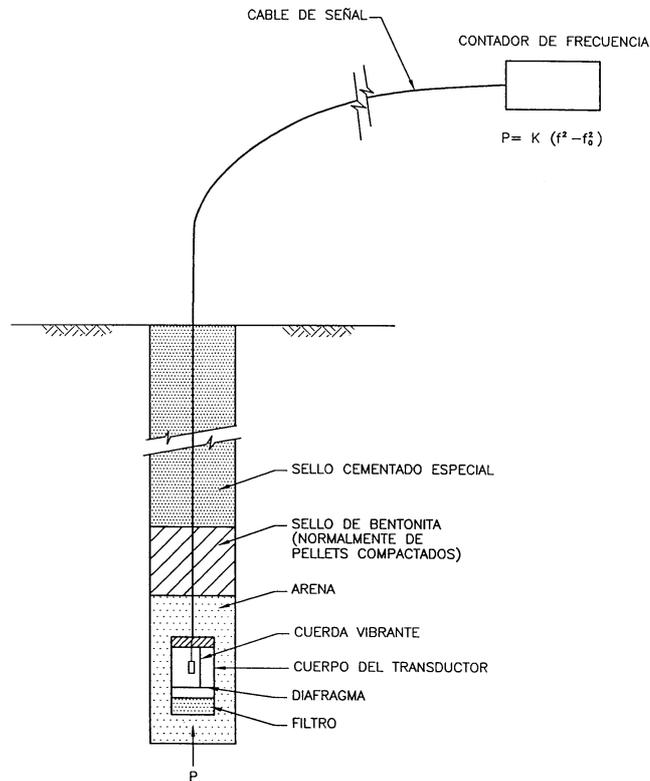


Figura 7.9. Piezómetro eléctrico de cuerda vibrante instalado en un sondeo.

7.9.4.3. Piezómetros eléctricos de cuerda vibrante

Estos instrumentos usan un diafragma conectado a un cable tensionado. Cuando el diafragma está sujeto a presiones de agua variables, la tensión del cable cambia, lo que a su vez se traduce en cambios en la frecuencia de resonancia. El cable es excitado magnéticamente y mide la frecuencia de resonancia. Las ventajas incluyen mayor estabilidad que las unidades de medida de tensión (discutible para algunos de los diseños más recientes de medida de tensión) e integración fácil con adquisición de los datos incluso para longitudes de cargas elevadas. Los inconvenientes incluyen el coste del equipo de lectura y el coste base de la unidad en sí misma.

7.9.4.4. Piezómetros *standpipe*

Estos piezómetros son de tipo tubería que se sellan en una posición particular en la formación para medir la presión de agua en un punto. La ventaja es que otros ensayos, como los de permeabilidad o muestreos de agua también, pueden llevarse a cabo. El inconveniente es que el volumen de agua exigido para fluir hacia el interior o fuera de la tubería para una medida de cambio de presión, significará que el nivel de agua se retrasará detrás de la presión de agua de la formación existente y que la instalación del piezómetro puede afectar a las presiones en la vecindad de la punta en materiales de permeabilidad baja. El resultado es que las presiones medidas por estas unidades estarán seriamente sesgadas, salvo en formaciones relativamente permeables.

Variaciones de este tipo de equipos son los Casagrande (los tipos de piezómetros *standpipe* originales) y los tipos de piezómetros Bishop que usan tubos de diámetro pequeño para limitar la cantidad de caudal de agua en y fuera del instrumento. Estos instrumentos son complejos y raramente se usan en la práctica, por lo que no se recomiendan para la instalación en escombreras, donde, probablemente, no se hará el mantenimiento requerido.

7.9.4.5. Piezómetros múltiples

Estos piezómetros disponen de varias fuentes y permiten una colocación de un número de aparatos superior al normal y que es factible instalar en un solo barreno. Las ventajas son el ahorro de costes en perforación y la posibilidad de hacer más medidas en un barreno, con lo que se consigue una mejor apreciación de las complejas condiciones de presión. Los inconvenientes son el aumento de la complejidad y un mayor coste. Dependiendo del modelo, puede haber dificultad en la integración con los datos adquiridos. Algunos instrumentos, como el sistema de Westbay y el sistema de Waterloo, también permiten realizar otras pruebas como bombeo o ensayos pudiéndose tomar muestras de agua.

7.9.5. Células de carga

Las células de carga consisten en un gato plano lleno de aceite que se pone en contacto con el plano del instrumento, perpendicular al vector de tensión a ser medido. El instrumento no está recomendado para la auscultación general de escombreras, sin embargo, si las presiones de poro son moderadas en la base de la misma, la colocación de una o más células de carga al mismo tiempo permitirá medir el cambio de tensión total.

Auscultación de escombreras

El resultado de los cambios de tensión total en la presión intersticial cambia como resultado de los materiales de la cimentación. La medida de la tensión total ayudará en la predicción de presiones de poro generadas por cargas en la escombrera. La otra alternativa es intentar predecir la carga ejercida en el subsuelo, lo que es difícil para una cara del talud de la escombrera que puede no ser rectilínea y que puede estar continuamente avanzando. Si las presiones intersticiales son medidas bajo la cara de avance de la escombrera, entonces hay que considerar la colocación de células de tensión.

7.9.6. Auscultación visual

La auscultación visual es una parte extremadamente importante dentro del régimen de auscultación de escombreras. Con todos los métodos sofisticados que existen es fácil olvidarse que la auscultación visual ofrece una serie de ventajas y que debería ser considerada como un método complementario a otros basados en instrumentaciones más sensibles. La auscultación visual se debería realizar en todas las escombreras, independientemente de la Clase a la que pertenezcan.

Cualquier programa de auscultación visual debe incorporar los elementos siguientes:

- a) Propuesta sistemática de observación de las características de la escombrera y registro de la información, con el cruce de datos de otras actividades de la escombrera. Empleo de hojas de registro del tipo tabla que sean adecuadas y que no provoquen en el observador la sensación de que no se refleja lo que él está viendo.
- b) Es útil tener el mismo equipo que haga las observaciones durante un período prolongado de tiempo con revisiones periódicas por personal distinto.
- c) Etiquetar y archivar las fotografías. Las fotografías generales de situación, así como los detalles específicos, como grietas de tracción, deben tomarse de una manera regular y continuada. El uso de cámaras que automáticamente graben la fecha es muy útil.

7.9.7. Otras técnicas

7.9.7.1. Auscultación por emisión acústica (EA)

El concepto de emisión acústica (EA) es relativamente simple. Cuando los materiales deslizan y se rompen, se produce un ruido que puede ser detectado mediante el empleo de acelerómetros (geófonos). La emisión acústica se define como las ondas elásticas transitorias generadas por la descarga rápida de energía dentro de un material. El método se desarrolló en 1930 por el US Bureau of Mines durante el estudio de estallidos de roca en minas debido a las tensiones generadas alrededor de las galerías.

Los recientes desarrollos han sido una aplicación a las técnicas de auscultación de deslizamientos y del agua que retienen las estructuras, para el estudio de la estabilidad, goteo y cavitación. El método se ha usado con éxito para predecir roturas en deslizamientos (Jurich, 1975), diques (deMonte, 1988), y para identificar áreas de rotura dentro de la cimentación de diques (Carabelli, 1987). Los equipos se han empleado frecuentemente en minas para detectar zonas de rotura (Blake, 1982 y Hardy, 1985). Schlumberger (1991) está trabajando

en equipos que permiten detectar la localización de superficies de cizalladura y que podrían ser aplicados a la auscultación de escombreras.

El sistema de auscultación de emisión acústica cuenta y graba el número de eventos sísmicos en el intervalo de muestra que iguala o excede alguno de los niveles prefijados del umbral de amplitud señalada. Además, si pueden ponerse en correlación eventos individuales entre tres o más geófonos, la situación del evento puede determinarse. Esto requiere el tratamiento de cantidades muy grandes de datos en tiempo real, pero que puede hacerse fácilmente con los ordenadores actuales.

Las emisiones acústicas se atenúan rápidamente en materiales sin consolidar, particularmente las frecuencias altas asociadas con la liberación de tensiones. La recepción de las emisiones acústicas depende de la situación de los sensores en la cercanía de los movimientos potenciales. Esto se puede hacer instalando inicialmente la instrumentación en la cimentación de la escombrera o instalando varillas de metal (guías de ondas) para transmitir las emisiones acústicas a un punto en la superficie donde la instrumentación pueda anclarse. Las guías de ondas pueden ser una barra reforzada, un piezómetro metálico *standpipe*/inclinómetro cubierto o un barreno entubado.

Por medio de una serie de sensores que cubren el área a estudiar, puede supervisarse el desarrollo de la inestabilidad y puede predecirse de antemano zonas de rotura potenciales. El inconveniente es que la cuantificación del movimiento no es posible y así, el método debe aplicarse conjuntamente con un método directo de la medida de desplazamiento. El método satisface bien la adquisición de los datos y su transmisión. Están disponibles unidades comerciales, aunque las unidades más avanzadas todavía son objeto de investigación y desarrollo.

En la actualidad, el empleo de la emisión acústica está en fase de investigación y los adelantos pueden ir encaminados a poder predecir o detectar ciertos tipos de inestabilidad de escombreras, así como de la degradación de los materiales de las mismas como resultado de cizallamientos en su interior.

7.9.7.2. Auscultación por emisión electromagnética

A partir de los estudios geofísicos de los terremotos se ha establecido que hay una liberación de energía electromagnética (EM) (i.e. ruido de radio) cuando las partículas de roca se fracturan. Esa liberación de energía se ha registrado en la ruptura de fallas cuando ha ocurrido un movimiento en la corteza terrestre, y en canteras después del disparo de una voladura. Las emisiones de EM también han sido medidas en el laboratorio cuando se han roto especímenes de roca.

Se han postulado muchos mecanismos posibles que podrían generar estas señales *sismoeléctricas* incluso los efectos piezoeléctricos, potenciales de flujo, efecto Lenard, generación del plasma, emisión de electrones y la electrificación de separación (O'Keefe y Thiel, 1991).

Investigaciones sobre radiación de EM después de una voladura en una cantera indican que *la señal continúa un minuto después de la explosión. Se piensa que la señal es causada por relajación de las rocas por detrás del lugar de la detonación. Cada pulso correspondería a una rotura producida en la roca. Cuando la tensión se libera el número de pulsos por segundo disminuye.* (O'Keefe y Thiel).

El método tiene ventajas potenciales en la auscultación de taludes de escombreras. Las roturas pueden predecirse dentro de la masa de la escombrera donde las emisiones de EM pueden estar ocurriendo como

Auscultación de escombreras

resultado de la ruptura de partículas de roca durante el desarrollo de una zona de rotura. Puede ser posible que por medio de una serie de antenas de EM a lo largo de la escombrera, las áreas de movimiento también puedan ser identificadas. Este método podría ser recomendado en la auscultación de escombreras cuando se pretenda investigar las escombreras y la estabilidad de los taludes.

7.9.7.3. Videometría

La videometría o videogrametría se refiere a los conjuntos de cámaras de video que, usados junto con métodos de procesamiento de la imagen, permiten medir la posición, orientación y movimiento de objetos en tres dimensiones. La videometría puede ser empleada para modelizar una escombrera por identificación de características visuales y analizando el movimiento de estas características durante un largo período de tiempo. La adquisición automatizada y el análisis de datos de imágenes que se emplean en tales sistemas proporcionan la capacidad de realizar a largo plazo una auscultación, pudiéndose colocar sistemas de alarma o emergencia en el caso de que hubiera desplazamientos en la escombrera.

La videogrametría se ha aplicado con éxito en la auscultación de la estabilidad de taludes y otras aplicaciones mineras (Rudenhauer 1990, Chandler 1989). La resolución y exactitud de tales sistemas están mejorando rápidamente, pero varían ampliamente con la aplicación. También es posible que la exactitud no sea suficientemente alta como para supervisar la cresta de una escombrera si el sistema se encuentra situado al pie de la misma. Un problema similar existe con el uso de métodos fotogramétricos.

El uso de la videogrametría proporciona ventajas potenciales por encima de los métodos convencionales geodésicos de auscultación de escombreras, permitiendo la auscultación selectiva de regiones específicas de interés en la superficie de la escombrera. Pueden auscultarse regiones múltiples de interés con costes incrementales mínimos (i.e. el coste de una cámara de video). Además, considerando que otras técnicas geodésicas proporcionan la estimación del movimiento en el talud a través de una serie de blancos individuales, el método de videogrametría tiene el potencial de obtener un campo del movimiento, utilizando el rastreo de muchas características visuales identificadas en la superficie del talud. También es un método pasivo que no presenta algunos de los riesgos asociados con las técnicas del láser.

Los inconvenientes incluyen el hecho de que la cara de una escombrera activa está en cambio constante. Así, el método puede ser más adecuado para supervisar áreas detrás de la cresta o movimientos de la cara de la estructura en momentos en los que no se está realizando la descarga de vertidos.

Dentro del desarrollo de esta técnica se incluye una valoración de la exactitud y la determinación de métodos para la calibración en campo de estos sistemas. Además se están haciendo adelantos en la tecnología de la videometría en áreas que hasta ahora estaban cubiertas por la fotogrametría. Como la videogrametría se basa en el análisis por ordenador de la información, satisface bien la adquisición de los datos y su transmisión.

Los sistemas de videogrametría pueden emplearse para la medida tridimensional de escombreras, independientemente del tamaño de las mismas, por adquisición de datos básicos a través de imágenes de video estando las cámaras situadas en diferentes posiciones. Esto puede lograrse usando un juego de instalaciones permanentes fijas o una plataforma temporal como un helicóptero, dependiendo de la lejanía del sitio, el tamaño de la escombrera, acceso y otras consideraciones. Estas imágenes de video pueden procesarse para crear:

- a) **Indicaciones de cambio de la forma o movimiento del blanco de la superficie de la escombrera.** Estas indicaciones podrían activar un sistema de llamada automatizada y/o alarma a una oficina local o grabación de los datos del registro o su impresión.
- b) **Modelo digital de la superficie de la escombrera.** Con esto se consigue describir la forma de la superficie de la escombrera y su almacenamiento puede servir para describir la deformación de la superficie a través del tiempo. Esto incluiría el descubrimiento de áreas erosionadas, deslizamientos a pequeña escala, roturas progresivas, así como el asentamiento general de la escombrera. Este modelo digital del terreno sería un modelo tridimensional exacto de la escombrera, con lo que podrían hacerse medidas de la deformación de la superficie y así registrar movimientos de taludes y los ritmos de movimiento en tiempo real.
- c) **Modelo estereodigital de la pila.** Esto consiste en el montaje de las imágenes de video dentro del modelo digital creado anteriormente, proporcionando una imagen tridimensional de la pila de escombros. Con un sistema apropiado, se podría examinar la escombrera desde una gran variedad de puntos de observación y desarrollar juicios cualitativos sobre el desarrollo de movimientos de la superficie. Hay que destacar que una imagen tridimensional o modelo podría también incluir puntos de referencia adyacentes a la escombrera, tales como edificaciones y caminos, y esa medida de distancia podría hacerse relativa a los puntos de referencia.
- d) **Pueden obtenerse varias vistas de perfil de la superficie de la escombrera a partir del modelo digital de la misma.**

En resumen, la videometría tiene el potencial de ser un método de auscultación de escombreras con un coste bajo, siendo versátil, pasivo, seguro y fácil de usar, y que habrá de tenerse en cuenta en desarrollos futuros.

7.9.7.4. Cámaras láser

Un sistema láser consta de un proyector de luz y una cámara de video para medir superficies en tres dimensiones. El objeto es descrito asignando coordenadas X, Y, Z a cada pixel de la imagen.

El equipo consiste en una cámara de video y un proyector del láser que se colocan en un punto conocido. El láser escanea la zona que la cámara de video puede grabar. Un ordenador posiciona el rayo de luz, traza el rayo en la imagen y calcula las coordenadas de los puntos.

La aplicación del sistema es similar a la de la videometría. En la actualidad, el rango del sistema está limitado y sólo podría usarse en escombreras pequeñas, pero en el futuro, el desarrollo del sistema permitirá su uso en escombreras más grandes. Los inconvenientes incluyen el posible riesgo de deterioro del láser, dependencia de las zonas de visión y de la potencia de la unidad, además de la precisión/rango limitado de las unidades actualmente disponibles.

El desarrollo de esta tecnología permitirá proporcionar datos útiles sobre escombreras de grandes dimensiones.

7.9.7.5. Termografías

Las termografías pueden emplearse si la escombrera se construye encima de capas de hielo o nieve, o si se

Auscultación de escombreras

espera que se produzca autocombustión de los materiales depositados. La medida de temperatura se hace generalmente usando termopares unidos a cables que se entierran en la escombrera o también mediante fotografías infrarrojas.

7.9.7.6. Muestreo de los estériles vertidos

Es probable que muestreando el material de la escombrera dentro de la misma se obtenga una información muy útil con respecto a ciertos modos de rotura potenciales, como la licuefacción. Actualmente, el muestreo de materiales granulares, como el material granular típico de una escombrera, está más allá de la tecnología disponible. Los métodos que podrían ser considerados incluyen la congelación (para los materiales saturados), varios métodos de inyección y métodos de ensayo *in situ*. En la actualidad no hay ningún método disponible que sea claramente capaz de proporcionar esta información. Hoy en día, no es posible muestrear partículas o fragmentos rocosos muy gruesos de escombreras.

7.10. REGISTRO, TRANSMISIÓN Y SIMPLIFICACIÓN DE DATOS

En líneas generales, existe una gran variedad de equipos disponibles, aunque muchos de ellos se desarrollaron para su utilización geotécnica y no son válidos para emplear en la auscultación de escombreras.

Existen diferentes tipos de sistemas que pueden ser considerados para distintas aplicaciones:

- a) Sistemas autosuficientes que guardan las lecturas en la unidad de campo. Las lecturas pueden ser transmitidas a través de acceso vía modem del teléfono o por inspección directa en el campo. Este tipo de sistemas sólo se recomienda en la auscultación de escombreras si los datos se transmiten a intervalos regulares frecuentes.
- b) Sistemas autosuficientes que acumulan lecturas de otras estaciones remotas. Estos sistemas son similares a los anteriores, salvo que en este caso puede haber diferentes unidades juntas.
- c) Unidades que registran y transmiten en tiempo real. Estas unidades son más sofisticadas, incorporan una gran variedad de alternativas de comunicación y el software más complejo. Los precios, generalmente, son más altos que para el equipo menos versátil citado anteriormente.

Dentro del campo de adquisición de datos, hay tres funciones diferentes: (i) la adquisición de los datos, (ii) la transmisión de los datos y (iii) la reducción de los datos y su interpretación. La mayoría de las unidades integran en el sistema, por lo menos, las primeras dos funciones.

7.10.1. Equipos de adquisición de datos

Hoy en día está disponible en el mercado una amplia variedad de equipos, bien como unidades autosuficientes o como unidades que son parte de un sistema más amplio. Hay que tener en cuenta que los equipos no se diseñaron para ambientes mineros agresivos, ya que muchas de las unidades existentes en el mercado se diseñaron originalmente para el uso meteorológico o hidrológico y las entradas requieren señales en el rango de 0-5 V DC. El uso de equipos con rangos de milivoltios, tales como los de instrumentación geotécnica, requieren el uso de módulos para su acondicionamiento.

7.10.2. Equipos de transmisión de datos

En las últimas décadas ha habido un gran avance en la industria electrónica. Esto ha producido una tecnología cambiante para los sistemas de recogida de datos automatizados y comunicaciones. Aunque los fabricantes de estos sistemas están diseñando equipos más sofisticados continuamente, un sistema de adquisición de datos automatizado continúa comprendiendo tres componentes básicos. Éstos son, Fig. 7.10:

- La unidad terminal remota (UTR) y los sensores.
- La interface de comunicaciones de telemetría.
- La estación base de control u ordenador.

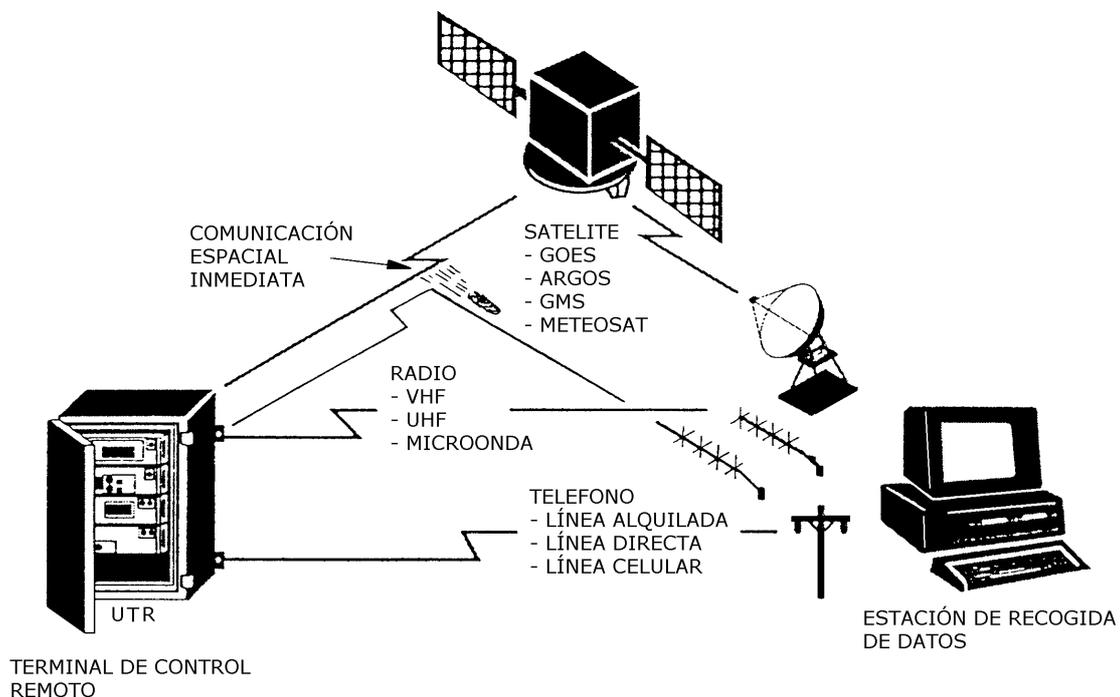


Figura 7.10. Componentes de un sistema de adquisición de datos.

Estos componentes se describen en los apartados siguientes.

7.10.2.1. Unidad terminal remota (UTR) y sensores

El componente básico de cualquier sistema telemétrico de adquisición de datos en tiempo real es la unidad terminal remota (UTR). Estas unidades consisten en una fuente de energía, un microprocesador y un convertidor analógico/digital (A/D) que proporciona una interface a los diferentes sensores. La UTR permite adquirir los datos remotos a través de los sistemas de comunicación de telemetría, o puede guardar datos *in situ* en la memoria *ram* para la recuperación futura. Para la mayoría de las escombreras no se recomienda que los datos guardados en la UTR permanezcan un período de tiempo grande debido a la posibilidad de retraso en la interpretación de datos críticos.

Auscultación de escombreras

Cualquier sensor analógico o digital descrito en este capítulo es capaz de ser unido con la UTR para proporcionar una gran variedad de medidas de campo. Sin embargo, hay que destacar que la unión de algunos instrumentos es más fácil que para otros.

7.10.2.2. La interfaz de telemetría

Los datos analizados y recogidos en la unidad terminal remota pueden transmitirse a una estación de tierra de las cuatro maneras diferentes que se analizan a continuación:

- ° Satélite.
- ° Radio.
- ° Teléfono.
- ° Comunicación espacial inmediata.

1. Satélite

Los dos sistemas de comunicaciones de satélite usados en América del Norte son el GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) y el ARGOS.

El sistema GOES opera desde 1975 por el NESS (National Environmental Satellite Service) del Departamento de Comercio de los Estados Unidos. Los satélites del sistema GOES se estacionan sobre el Ecuador y retransmiten los datos recibidos desde una unidad terminal remota a una estación receptora central. Los datos se hacen entonces disponibles para el usuario terminal a través de las líneas de tierra. Este servicio se ofrece libre de cargo a los usuarios aceptados y se formaliza a través de los acuerdos escritos entre el usuario y el NESS.

El sistema ARGOS es una unión entre el satélite científico francés y el americano. Este sistema consiste en satélites que orbitan alrededor de unos geoestacionarios por lo que la comunicación del satélite está sólo disponible cuando éste se encuentra por encima del punto de medida. El sistema ARGOS no proporciona que la retransmisión de los datos sea libre de cargo. Pueden obtenerse los precios y la autorización de uso del satélite C.N.E.S. en Toulouse, Francia.

2. Radio

Los datos de las estaciones remotas también pueden ser transmitidos por radiotelemetría. Las opciones de la radio incluyen el uso de VHF, UHF y microondas. Los usuarios de estos sistemas de comunicación tienen un control completo de sus sistemas y pueden transmitir los mensajes durante más tiempo y más frecuentemente que si emplearan las agencias de satélites. El rango fiable es menor que para comunicaciones por satélites.

3. Comunicación espacial inmediata

Este sistema está basado en el fenómeno de que las ondas de radio se reflejan fuera de los caminos ionizados dejados por meteoritos que entran en la atmósfera de la Tierra. Las comunicaciones son de rango largo y se hacen en una pequeña ventana siempre que ésta esté disponible. Las ventanas están disponibles normalmente durante unos 10 segundos como mucho, pero con una gran frecuencia (cada pocos segundos).

La información se transmite como un paquete comprimido de forma inmediata. Las redes típicas consisten en una estación de mando y muchas estaciones remotas. Las frecuencias en el rango de 30 a 50 MHz son las más prácticas.

4. Teléfono

La línea del teléfono es, probablemente, el medio más barato de transmisión de datos. Sin embargo, esto depende de los servicios locales disponibles en la estación remota. Como se sugiere en la Fig. 7.9, podrían lograrse comunicaciones en una línea alquilada, línea celular o directa.

5. Terminal de control o estación base

Como se comentó anteriormente, los datos retransmitidos desde un satélite se envían a estaciones receptoras como la NESDIS, Maryland. Con el uso del software apropiado y las líneas de comunicación, los datos se envían finalmente al sistema de ordenadores de los usuarios.

7.10.3. Reducción de los datos

La información de este apartado está basada en datos de suministradores de equipos y otros usuarios finales, así como de la experiencia general de HBT en este campo.

Los factores clave incluyen:

- a) Compatibilidad global con otras partes del sistema.
- b) La manera en la que la información se usa e interpreta.
- c) La forma en la que se implantarán las alarmas.
- d) Aviso de problemas que se desarrollen en cualquier punto dentro del sistema.

El software que está disponible o en uso puede ser dividido en tres categorías:

- a) El software relativamente simple proporcionado normalmente como parte de una unidad de adquisición de datos que es capaz de realizar funciones de alarma y puede proporcionar servicios de impresión o trazado gráfico.
- b) Software, como Lotus 123 o Excel, que proporciona servicios gráficos, pero que no proporciona un alto nivel de interface con la unidad de adquisición de datos. Es posible combinar programas de comunicación existentes con otros programas como Lotus 123 o Excel bajo un programa de tipo de lote y, para usar los medios de las macros en los dos programas, automatizar el proceso completo de transmitir y trazar. Tales sistemas, normalmente, son configurados por el usuario terminal.
- c) Software sofisticado que automatiza el proceso completo de la integración desde las unidades de campo hasta el trazado gráfico de los resultados.

7.11. EVALUACIÓN DE LOS DATOS

La evaluación de los datos obtenidos debe ser efectuada por personal con experiencia en geotecnia. Debe tratarse de profesionales familiarizados con los aspectos técnicos del diseño de escombreras mineras, con la planificación del programa de auscultación, con el procedimiento de construcción y con los detalles de la instalación de los instrumentos, recogida de datos, proceso y presentación de los mismos. Deben tener conocimientos en análisis informático y ser capaces de emitir un juicio técnico-ingenieril.

El objetivo inicial del procesamiento de datos recogidos por los instrumentos es el de proporcionar una evaluación rápida que permita detectar cambios que requieran una actuación inmediata. El segundo objetivo es sistematizar y presentar los datos con el fin de mostrar las tendencias y comparar el comportamiento observado con las predicciones, de forma que se puedan acometer las acciones pertinentes.

La evaluación de los datos se encuentra condicionada por el tipo de proyecto y por los instrumentos empleados. La interpretación de los datos recogidos no se debe demorar hasta que se haya conseguido un volumen de datos elevado, ya que las etapas de recogida, procesado y evaluación de los mismos pueden interferirse entre sí. Además, es necesario dar respuestas rápidas a los cambios que indiquen los resultados de los instrumentos. Las lecturas de los instrumentos deben ser revisadas concienzudamente por los técnicos, de forma que pueda comprobarse su validez. Para ello, son especialmente útiles los registros efectuados durante la perforación de los sondeos y durante la instalación de los equipos, ya que las dificultades encontradas en la instalación pueden reflejarse en resultados anómalos durante la vigilancia posterior.

La evaluación reiterada de los datos recogidos es un proceso continuo. Los resultados iniciales se deben evaluar tentativamente relacionándolos siempre con los datos posteriores que irán facilitando una mejor interpretación del comportamiento real de la escombrera. Así, la correcta evaluación del funcionamiento de un instrumento casi siempre exige un período prolongado de estudio de los datos que proporciona.

Existen varios tipos de gráficos para la evaluación de los datos, Fig. 7.11. Entre otros, se pueden mencionar las representaciones habituales de datos con respecto al tiempo, los gráficos que incluyen predicciones, los que comparan las predicciones con las mediciones efectuadas y los gráficos de relación *causa - efecto*. Cada tipo de gráfico responde a unas necesidades específicas y al plan de instrumentación que se haya diseñado en cada caso. El objetivo final es el de observar más fácilmente las relaciones existentes entre el avance de la escombrera, los movimientos, la pendiente del talud y la pluviometría.

7.12. REQUERIMIENTOS DE INFORMES

La información correspondiente a la auscultación debe formar parte de los informes internos periódicos de la mina, ya sea de carácter trimestral o anual. Deben incluir los siguientes aspectos:

- ° Gráficos-resumen actualizados.
- ° Un breve informe acerca de todos los cambios significativos en los parámetros medidos desde el último informe periódico, indicando las posibles causas que los produzcan.
- ° Actuaciones recomendadas.

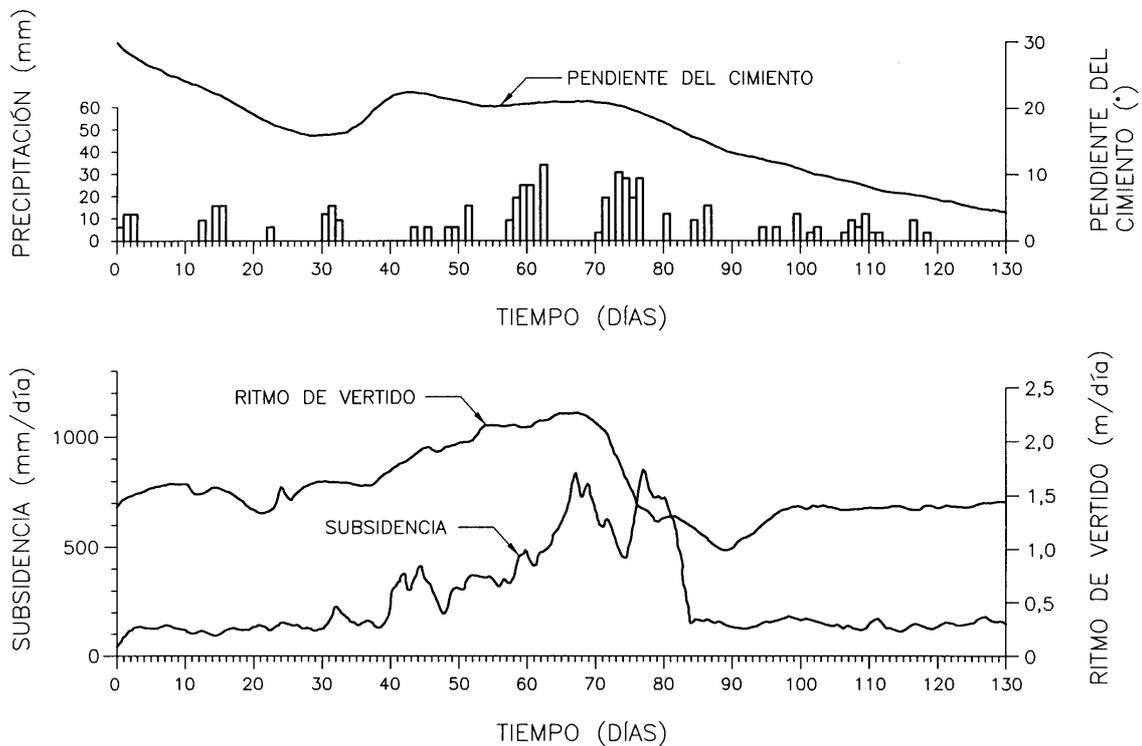


Figura 7.11. Gráficos de subsidencia, ritmo de vertido, precipitaciones y pendiente del cimiento a lo largo del tiempo.

Los informes trimestrales o anuales internos se realizan para documentar los aspectos clave del programa de auscultación, así como para justificar las correspondientes actuaciones que se acometan. Deberá incluir la información siguiente:

- ° Resumen del informe.
- ° Introducción, incluyendo una breve descripción del proyecto y la razón por la que es necesario el empleo de instrumentación geotécnica.
- ° Información relevante del diseño y montaje del programa de auscultación.
- ° Resumen de la fase del programa de auscultación.
- ° Descripción de los instrumentos y de los sistemas de lectura.
- ° Planos suficientes para detallar el número de instrumentos y su ubicación.
- ° Fotografías representativas.
- ° Datos geotécnicos de la superficie y del subsuelo.
- ° Procedimientos de calibración y mantenimiento de los instrumentos.

Auscultación de escombreras

- ° Procedimientos de recogida, presentación e interpretación de datos.
- ° Comportamiento observado, incluyendo gráficos-resumen y factores que influyen en las medidas observadas.
- ° Análisis del comportamiento observado, comparando las medidas observadas con las correspondientes predicciones y estudiando los cambios significativos con sus posibles causas, contrastando la información con publicaciones existentes.
- ° Conclusiones, discusiones y recomendaciones incluyendo una descripción de las actuaciones acometidas para su resolución.

El informe interno debe incluir, además, una evaluación del programa de vigilancia que comprenda el funcionamiento de los instrumentos, las técnicas de calibración e instalación, la recogida de datos, su procesado, los procedimientos de presentación e interpretación y recomendaciones para la implantación de futuros programas de auscultación.

7.13. LECTURA DE LOS INSTRUMENTOS. ACTUACIONES NECESARIAS

El propósito principal de la instrumentación de una escombrera minera es el de alertar de una posible rotura e impedir su aparición. Será obviamente conveniente que el sistema sea capaz de detectar el fallo con la mayor antelación posible.

En la Tabla 7.5 se resume un ejemplo que, a modo de guía, indica la relación entre unas lecturas tomadas y las actuaciones correspondientes a llevar a cabo. Pueden servir de orientación a la hora de adoptar medidas preventivas cuando se detectan movimientos en las escombreras. No se trata de una serie de instrucciones acerca de cómo actuar ante ciertos movimientos detectados, sino como una mera orientación, que deberá complementarse con la experiencia que se tenga del material de vertido, incluyendo tipo de material, resistencia al corte, presión del agua intersticial y de la altura de la escombrera.

7.14. REQUERIMIENTOS PARA EL CIERRE Y REAPERTURA

Según los criterios empleados anteriormente, no resulta infrecuente la interrupción de los trabajos de vertido como consecuencia de una deformación excesiva. Así, se deben seguir las siguientes normas de seguridad durante y después de estas interrupciones.

7.14.1. Restricción del acceso

La señalización correcta de las escombreras cerradas es crítica para la restricción de los accesos y del vertido. Las zonas restringidas serán tanto las plataformas de los trabajos de vertido, como toda zona aguas abajo que pudiera verse afectada por una rotura eventual. La señalización a corto plazo de un cierre temporal para impedir accesos no autorizados se puede conseguir mediante carteles fluorescentes. Un cierre de accesos más permanente a largo plazo se puede conseguir construyendo con estériles una berma o banquetta que cruce la entrada y que se complemente con la señalización pertinente.

Se debe limitar la entrada al personal autorizado para la auscultación y la inspección, manteniendo los equipos pesados fuera de la escombrera.

TABLA 7.5. Criterio típico de movimiento de escombreras.

NIVEL	RITMO DE DEFORMACIÓN DIARIA (mm/día)	INTERVALO ENTRE LECTURAS	ACTUACIÓN NECESARIA
1	Al inicio del relevo	-	Revisar el informe de vigilancia del relevo anterior para evaluar el comportamiento de la escombrera.
2	0 - 170 mm	4 horas	Normal.
3	170 - 250 mm	2 horas	Se recomienda precaución.
4	250 - 330 mm	1 hora	Se recomienda precaución. Las observaciones visuales son muy importantes.
5	330 - 425 mm	1 hora	Extremar las precauciones. Efectuar frecuentes observaciones visuales. El capataz debe indicar a los conductores de los volquetes la necesidad de verter con precaución y a los maquinistas de los tractores de empujar material fuera de la escombrera. Si es posible, cambiar el punto de vertido.
6	425 - 500 mm	1 hora	Vertidos cortos o alternos. Buscar otro punto de vertido.
7	> 500 mm	1 hora	Detener el vertido en esa zona y cerrar la escombrera. Verter en otros puntos.

NOTAS:

1. Si sólo se registra una lectura de 500 mm/día se interrumpe el vertido. Esta suspensión se mantiene hasta que se registren lecturas de menos de 500 mm/día durante un período de 12 horas.
2. Si se registran varias lecturas consecutivas de 500 mm/día, el vertido se suspende. Esta interrupción se mantiene hasta que se registren lecturas de menos de 500 mm/día durante un período de 24 horas.
3. Se deben vigilar las escombreras no operativas 24 horas antes de iniciar el vertido, a intervalos de cuatro horas.

7.14.2. Reapertura de las escombreras después de su cierre

En algunas Disposiciones Internas de Seguridad de alguna mina se contempla que no se puede reabrir una escombrera que haya permanecido inactiva durante un período mayor de cuatro horas sin una inspección realizada por la persona cualificada correspondiente. Sin embargo y, atendiendo a los criterios expuestos anteriormente, se debería efectuar una vigilancia a intervalos de cuatro horas durante un período de 24 antes de la reapertura. Durante dicho período, las lecturas deberán encontrarse dentro de los límites expuestos y poder considerarse seguras para la escombrera en cuestión. La decisión de reapertura de una escombrera cerrada por inestabilidad o por excesivo desplazamiento debe ser adoptada por el director de la mina.

7.15. AUSCULTACIÓN, INSPECCIÓN Y ARCHIVO DE LA INFORMACIÓN

7.15.1. Clasificación de las escombreras mineras

La clasificación de las escombreras mineras permite acomodar un programa modelo de auscultación e inspección a todas las escombreras que reúnan características similares. El sistema de clasificación debe permitir ordenar las escombreras en función del riesgo global o de las consecuencias de una rotura o un funcionamiento indebido de las mismas. El sistema de clasificación de estabilidad de escombreras, MINESCOM, permite asociar un valor numérico a un conjunto de características que describen una escombrera.

En la Tabla 7.6 se representan los requerimientos de auscultación, inspección e informes según el Esquema de Clasificación de la Estabilidad de las Escombreras. Se distinguen cuatro categorías de escombreras de acuerdo con su valoración en la clasificación.

7.15.2. Recopilación de la información recogida

El correcto archivo de la información posibilita el desarrollo de criterios empíricos de estabilidad; de ahí su gran importancia. Mediante el registro de los datos recogidos se puede evaluar el impacto que tiene cada uno de los parámetros estudiados en la estabilidad. Una lista de los parámetros a estudiar es la siguiente:

- ° Ritmos de desplazamiento.
- ° Ritmo de avance de la cresta. Es un parámetro que se puede correlacionar con el ritmo de desplazamiento y, por tanto, con posibles inestabilidades.
- ° Calidad de los materiales. Se debe controlar el vertido de materiales de baja calidad, que se deben destinar únicamente a zonas muy específicas de la escombrera.
- ° Meteorología. Se debe llevar un cuidadoso registro histórico de las precipitaciones, tanto de lluvia como de nieve.
- ° Voladuras. Se debe llevar un registro de las operaciones de la mina. Las voladuras pueden afectar a la escombrera de dos formas: a causa de las vibraciones y como consecuencia de la fisuración excesiva de los materiales de vertido.
- ° Actividad sísmica.
- ° Topografía original.

Estos registros se deben realizar cualquiera que sea la clasificación en cuanto a estabilidad de la escombrera, con la periodicidad que se indica en la Tabla 7.6.

Todos los datos recogidos en la misma mina deben revisarse regularmente, de forma que se puedan efectuar los cambios que sean eventualmente necesarios y se reflejen lo antes posible en la operación de la escombrera.

TABLA 7.6. Requerimientos de inspección, vigilancia e informes.

CLASE DE ESTABILIDAD	VALOR DE CLASIFICACIÓN	REQUERIMIENTOS				
		INSTRUMENTACIÓN DE AUSCULTACIÓN	PARTE DE RELEVO	INSPECCIÓN		DOCUMENTO
				DESCRIPCIÓN	FRECUENCIA	
I	< 300	Inspección visual sólo si se detectan movimientos inesperados. Piezómetros cuando sean aplicables.	Sí	Inspección realizada por el jefe de relevo. Inspección periódica detallada realizada por el ingeniero responsable.	4 horas Anual	Parte de relevo. Informe anual.
II	300 - 600	Instrumentación necesaria si se identifican movimientos distintos a los de hundimientos por consolidación. Piezómetros cuando sean aplicables.	Sí	Inspección realizada por el jefe de relevo. Si se efectúa auscultación, inspección e interpretación de los datos registrados por el ingeniero responsable. Inspección periódica detallada por el ingeniero responsable.	4 horas Diaria Anual	Parte de relevo. Inspección cuatrimestral. Informe anual.
III	600 - 1200	Instrumentación para auscultar movimientos tal como se haya especificado por el consultor proyectista. Piezómetros cuando sean aplicables.	Sí	Inspección realizada por el jefe de relevo. Si se efectúa auscultación, inspección e interpretación de los datos registrados por el ingeniero responsable. Inspección periódica detallada por el ingeniero responsable. Inspección por un técnico consultor independiente.	4 horas Diaria Mensual Anual	Parte de relevo. Inspección cuatrimestral. Informe anual del consultor independiente.
IV	> 1200	Programa de instrumentación detallado a ser especificado por el consultor proyectista. Piezómetros cuando sean aplicables. Piezómetros probablemente necesarios en la cimentación, si existe cualquier suelo de grano fino.	Sí	Inspección realizada por el jefe de relevo. Si se efectúa auscultación, inspección e interpretación de los datos registrados por el ingeniero responsable. Inspección periódica detallada por el ingeniero responsable. Inspección por un técnico consultor independiente.	4 horas Diaria Mensual Anual (mínimo)	Parte de relevo. Inspección cuatrimestral. Informe anual del consultor independiente, frecuentemente a petición de la Autoridad Minera.

7.15.3. Requerimientos en la auscultación

A partir de la clasificación de la escombrera, se debe diseñar un programa específico de auscultación que podrá revisarse cuando se considere oportuno, ya sea en la naturaleza de las medidas que se desee tomar, como en la frecuencia de las mismas.

Se debe considerar, en cualquier caso, que la Tabla 7.6 es orientativa y que los programas de auscultación pertinentes deben ser realizados por un ingeniero especializado en Geotecnia.

7.15.4. Inspección de escombreras

Las inspecciones regulares tienen por objeto poner de manifiesto cambios e irregularidades en cuanto al

Auscultación de escombreras

funcionamiento, aspecto o métodos constructivos empleados en la escombrera. Deberá constar de:

- ° Nombre y localización, fecha de la inspección, fecha de la anterior y nombre y firma del inspector.
- ° Una breve explicación de las actuaciones adoptadas a partir de las recomendaciones de otras inspecciones previas.
- ° Un resumen de la inspección actual. Debe indicar si es necesaria una actuación y en qué zona o zonas.
- ° Puntos a revisar en cada inspección.

La finalidad de un formulario eficaz es la de facilitar el almacenamiento de la información en un registro permanente de inspecciones.

La mayor parte de las observaciones deben rellenarse en forma de marcas y abreviaturas en los puntos que incluya el formulario. Los aspectos que no se puedan indicar de esa forma se podrán incluir en una página de observaciones complementaria.

Se deberá adjuntar un plano, esquema o croquis de la escombrera señalando las zonas problemáticas.

A continuación se exponen los distintos tipos de formularios a completar.

DESCRIPCIÓN DE LA ESCOMBRERA

EXPLOTACIÓN _____

NOMBRE DE LA ESCOMBRERA O CÓDIGO _____

FECHA DE INSPECCIÓN (D/M/A) _____

FECHA DE INSPECCIÓN ANTERIOR (D/M/A) _____

NOMBRE DEL INSPECTOR _____

FIRMA DEL INSPECTOR _____

RESUMEN DE LAS ACTIVIDADES EFECTUADAS DESDE LA ÚLTIMA INSPECCIÓN

RESUMEN DE LA INSPECCIÓN

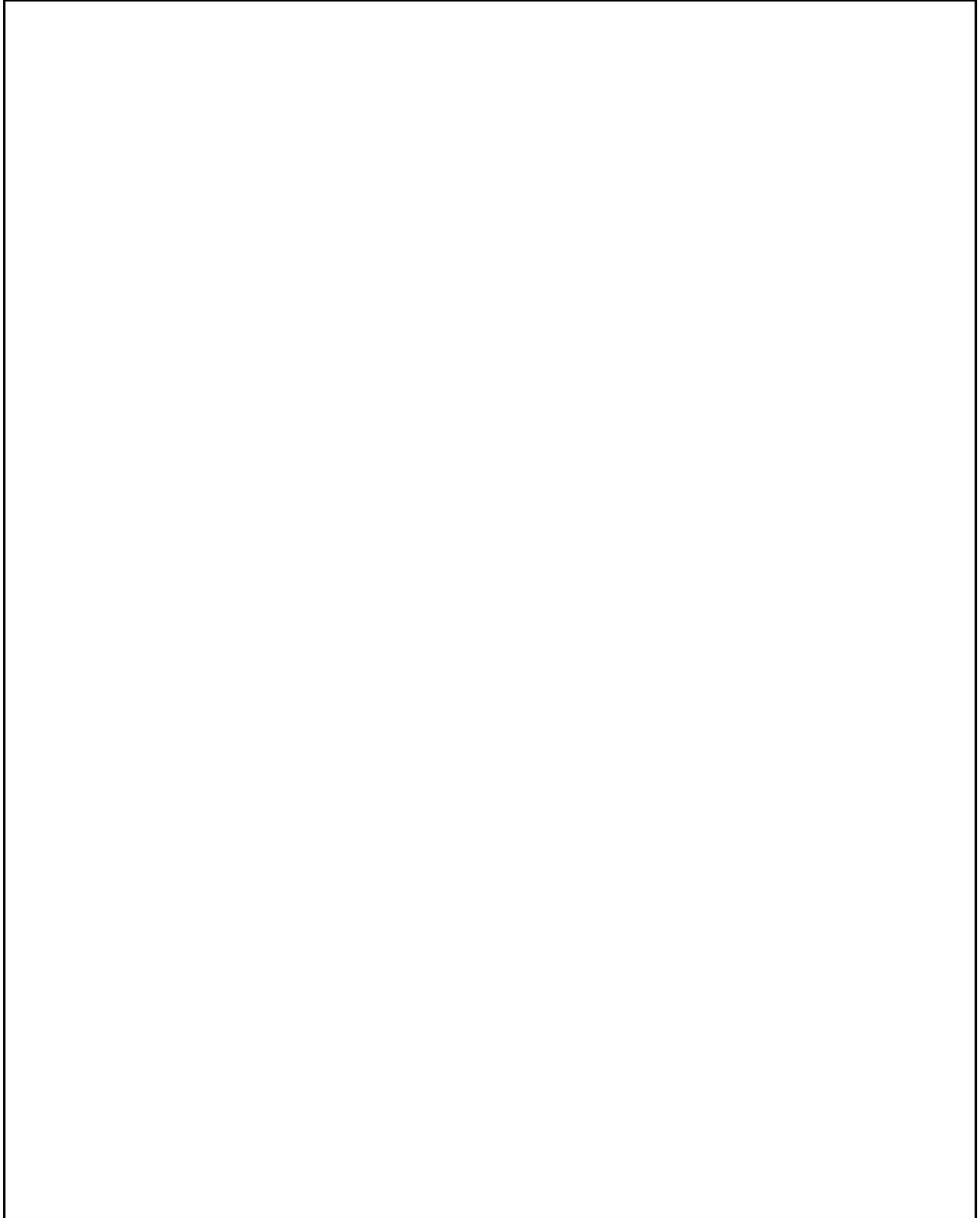
	ACCIÓN REQUERIDA			
	NINGUNA	REVISIÓN INMEDIATA DEL LUGAR POR EL ENCARGADO	REVISIÓN INMEDIATA POR TÉCNICO RESPONSABLE	SE REQUIERE ACTUACIÓN DE EMERGENCIA
Condiciones generales del área				
Condiciones del emplazamiento y construcción				
Condiciones de la superficie y los taludes				
Filtraciones				
Erosión				
Desvío de corrientes de agua				
Corrientes de agua a través de la escombrera				
Instrumentación				
Consideraciones adicionales				

Auscultación de escombreras

	CAMBIOS DESDE LA INSPECCIÓN ANTERIOR	VARIACIÓN DEL DISEÑO	ACCIONES TOMADAS
<p>CONDICIONES GENERALES DEL ÁREA</p> <ul style="list-style-type: none"> Desarrollo aguas arriba y aguas abajo Situación de la divisoria Características de las corrientes de agua <p>CONDICIONES DEL EMPLAZAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN</p> <ul style="list-style-type: none"> Preparación del cimientó Colocación de materiales Caminos y pistas de acceso Situación general del área y mantenimiento Otros <p>CONDICIONANTES DE LA SUPERFICIE Y LOS TALUDES</p> <ul style="list-style-type: none"> Grietas en plataforma Grietas en crestas Grietas en talud Sobrependiente en cresta Abombamiento de talud Corrimiento de pie Otros <p>FILTRACIONES</p> <ul style="list-style-type: none"> Del talud de escombrera De los drenes De laderas naturales Otros <p>EROSIÓN</p> <ul style="list-style-type: none"> Del frente de talud En otras partes <p>DESVÍO DE CORRIENTES DE AGUA</p> <ul style="list-style-type: none"> Obstrucciones Erosión Escollera o revestimientos Punto de descarga <p>CONDICIONES DE AGUA A TRAVÉS DE LA ESCOMBRERA</p> <ul style="list-style-type: none"> Obstrucciones a la entrada Erosión de finos Punto de descarga <p>INSTRUMENTACIÓN</p> <ul style="list-style-type: none"> Extensómetros de cable Hitos topográficos Piezómetros Otros <p>CONSIDERACIONES ADICIONALES</p> <ul style="list-style-type: none"> Calidad del agua Cubierta de suelo Vegetación Otros 			

LEYENDA COLUMNA DE CAMBIOS	COLUMNA DE VARIACIÓN	COLUMNA DE ACCIONES
<p>NA = No Aplicable</p> <p>SC CA = Sin cambio apreciable y condiciones aceptables.</p> <p>SC-A = Sin cambio, pero ver significado de "A"</p> <p>M = Mejor desde la última inspección.</p> <p>Nota: "A", "B", etc. Ver información complementaria</p>	<p>MA = No Aplicable</p> <p>NV = Sin variación aparente</p> <p>Nota: "A", "B", etc. ver información complementaria</p>	<p>NINGUNA</p> <p>IE = Informado el Encargado</p> <p>IT = Informado el Técnico responsable.</p> <p>ITMA = Informado el Técnico de Minas de la Administración</p>

ESQUEMA DE LA ESCOMBRERA Y EL ÁREA PRÓXIMA CON LOCALIZACIÓN DE PROBLEMAS



7.15.5. Elaboración de informes

Como ya se ha indicado en la Tabla 7.6, las características y frecuencia de los informes dependen de la clasificación de estabilidad de la escombrera. En algunos países se exige el archivo de los informes de relevo de todas las escombreras. Se recomienda elaborar un informe resumido anual para las Clases I y II. Para las Clases III y IV se recomienda preparar informes internos trimestrales y un informe anual de un especialista independiente sobre la estabilidad y comportamiento de la escombrera.

En cualquier caso, se podrá exigir un seguimiento más detallado o frecuente a petición de la Autoridad competente.

7.16. INFORME DE ROTURA DE ESCOMBRERA Y ANÁLISIS RETROSPECTIVO

7.16.1. Introducción

Las consecuencias de la rotura de una escombrera pueden ser muy graves, en términos de vidas humanas, en daños materiales y en afección medioambiental. Los informes detallados, la correcta evaluación y los análisis posteriores pueden contribuir a mejorar la comprensión de los mecanismos de rotura y las técnicas operativas para reducir de esta forma otras roturas en el futuro.

7.16.2. Informe de la rotura

El informe de la rotura debe ser una descripción detallada, concisa y completa de la misma. La información que se incluya debe facilitar el mejor conocimiento de los mecanismos y las causas de la rotura y permitir la elaboración de un análisis posterior de ésta, Fig. 7.12.

INFORME DE LA ROTURA DE UNA ESCOMBRERA

EXPLOTACIÓN

ESCOMBRERA

FECHA (D/M/A)

HORA

LOCALIZACIÓN

Latitud

Longitud

Cota del techo de escombrera

Cota del pie de escombrera

Cota del techo de superficie de rotura

Cota del pie de superficie de rotura

TIPO DE ROTURA Y GEOMETRÍA

Descripción de la superficie de rotura en cuanto a forma y materiales afectados (e.g. estériles, recubrimiento o sustrato rocoso).

También detalles topográficos antes y después de la rotura y secciones representativas.

VOLUMEN DE MATERIAL COLAPSADO (m³)

DISTANCIA DE CORRIMIENTO (m) (de pie de escombrera a pie de corrimiento)

ÁNGULO DE CORRIMIENTO (de pie de corrimiento a cresta de escombrera)

VELOCIDAD DE ROTURA (m/s)

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL

Porcentaje de cada tipo de material afectado por la rotura, tales como areniscas, pizarras, etc.

Para cada tipo de material dar si es posible información acerca de su granulometría y resistencia.

Añadir información adicional cuando sea posible

CONDICIONES DEL CIMIENTO

Descripción de la estratigrafía, tamaños de grano, pendiente zonas con filtraciones

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA

Descripción de las condiciones piezométricas (e.g. escombrera saturada o drenada, presiones piezométricas altas o bajas en el cimiento) y datos complementarios

DATOS DE AUSCULTACIÓN

Velocidades de movimiento e historial, con datos complementarios

DATOS CLIMATOLÓGICOS

Indicar cualquier precipitación significativa

RITMOS DE VERTIDO

En términos de avance de cresta en metros por día

INFORMACIÓN SÍSMICA

Indicar cualquier evento de sismicidad natural o debido a grandes voladuras

ROTURAS PRENDAS (¿S/N?)

Adjuntar informe

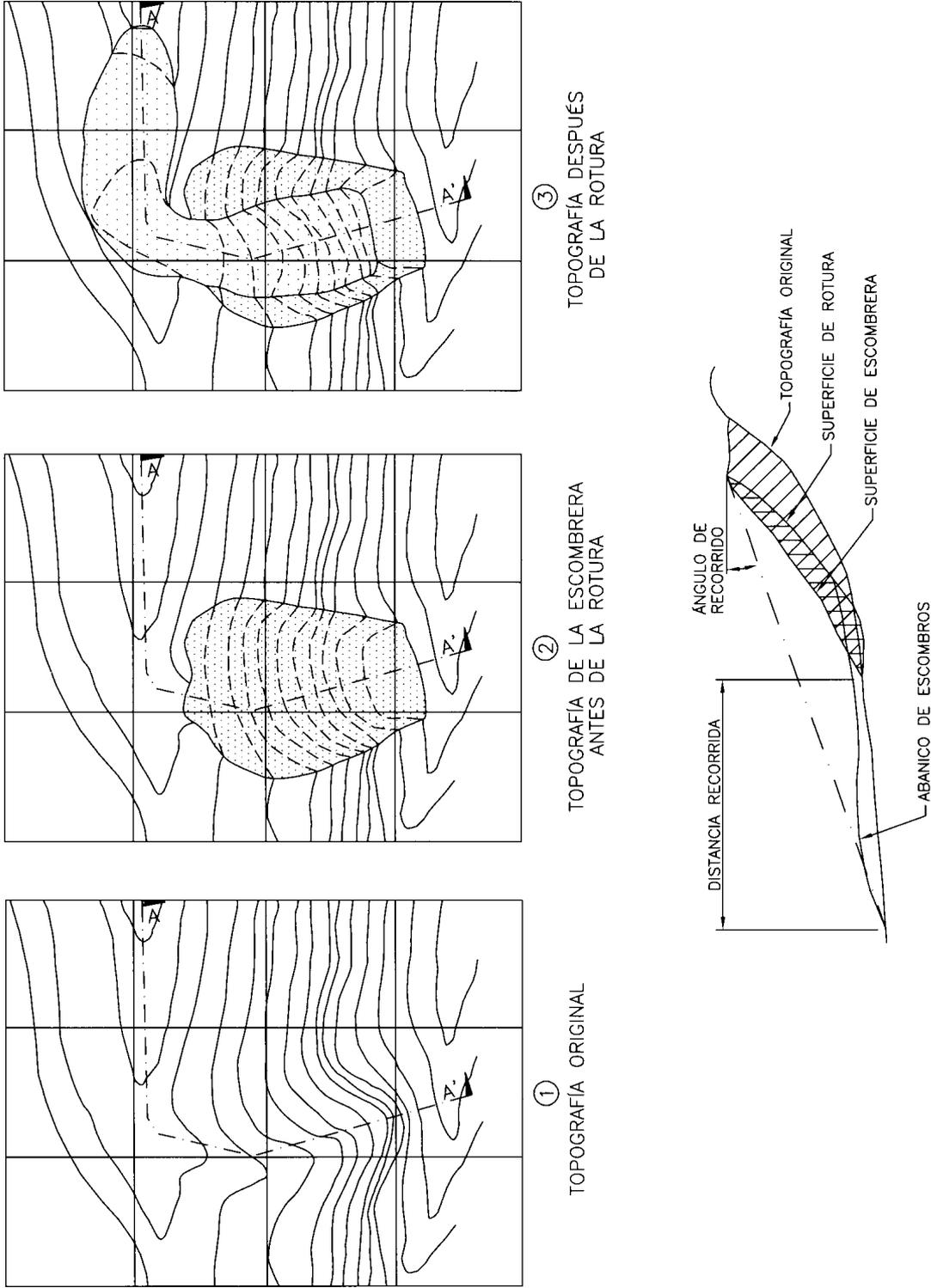
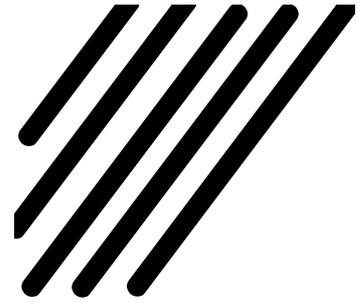


Figura 7.12. Planos topográficos para adjuntar al informe de rotura.

7.1.	INTRODUCCIÓN	7-1
7.2.	SIGNIFICADO DE LA AUSCULTACIÓN	7-2
7.3.	INSPECCIONES VISUALES	7-4
7.3.1.	Cresta de la escombrera	7-5
7.3.2.	Talud de la escombrera	7-5
7.3.3.	Cimentación de la escombrera	7-6
7.3.4.	Auscultación acústica	7-6
7.4.	MÉTODO OBSERVACIONAL	7-6
7.5.	APLICABILIDAD DE LOS MÉTODOS DE AUSCULTACIÓN	7-7
7.6.	TIPOS DE ROTURA	7-8
7.7.	PROBLEMAS HABITUALES EN LA AUSCULTACIÓN DE ESCOMBRERAS	7-12
7.8.	SELECCIÓN DE LOS MÉTODOS DE AUSCULTACIÓN	7-13
7.8.1.	Introducción	7-13
7.8.2.	Requisitos generales	7-14
7.8.3.	Elección de la auscultación con relación a la clasificación de escombreras	7-14
7.9.	TECNOLOGÍA APLICABLE A LA AUSCULTACIÓN DE ESCOMBRERAS	7-18
7.9.1.	Elección de la instrumentación según las necesidades de auscultación	7-18
7.9.2.	Perforación	7-18
7.9.3.	Movimientos	7-19
7.9.3.1.	Extensómetros de cables	7-19
7.9.3.2.	Extensómetros enterrados	7-22
7.9.3.3.	Inclinómetros	7-22
7.9.3.4.	Levantamiento topográfico	7-22
7.9.4.	Presiones intersticiales del agua	7-23
7.9.4.1.	Piezómetros neumáticos	7-24
7.9.4.2.	Piezómetros de resistencia eléctrica	7-24
7.9.4.3.	Piezómetros eléctricos de cuerda vibrante	7-27
7.9.4.4.	Piezómetros <i>standpipe</i>	7-27
7.9.4.5.	Piezómetros múltiples	7-27
7.9.5.	Células de carga	7-27
7.9.6.	Auscultación visual	7-28
7.9.7.	Otras técnicas	7-28
7.9.7.1.	Auscultación por emisión acústica (EA)	7-28
7.9.7.2.	Auscultación por emisión electromagnética	7-29
7.9.7.3.	Videometría	7-30
7.9.7.4.	Cámaras láser	7-31
7.9.7.5.	Termografías	7-31
7.9.7.6.	Muestreo de los estériles vertidos	7-32

Auscultación de escombreras

7.10. REGISTRO, TRANSMISIÓN Y SIMPLIFICACIÓN DE DATOS	7-32
7.10.1. Equipos de adquisición de datos	7-32
7.10.2. Equipos de transmisión de datos	7-33
7.10.2.1. Unidad terminal remota (UTR) y sensores	7-33
7.10.2.2. La interfaz de telemetría	7-34
7.10.3. Reducción de los datos	7-35
7.11. EVALUACIÓN DE LOS DATOS	7-36
7.12. REQUERIMIENTOS DE INFORMES	7-36
7.13. LECTURA DE LOS INSTRUMENTOS. ACTUACIONES NECESARIAS	7-38
7.14. REQUERIMIENTOS PARA EL CIERRE Y REAPERTURA	7-38
7.14.1. Restricción del acceso	7-38
7.14.2. Reapertura de las escombreras después de su cierre	7-39
7.15. AUSCULTACIÓN, INSPECCIÓN Y ARCHIVO DE LA INFORMACIÓN	7-40
7.15.1. Clasificación de las escombreras mineras	7-40
7.15.2. Recopilación de la información recogida	7-40
7.15.3. Requerimientos en la auscultación	7-41
7.15.4. Inspección de escombreras	7-41
7.15.5. Elaboración de informes	7-48
7.16. INFORME DE ROTURA DE ESCOMBRERA Y ANÁLISIS RETROSPECTIVO	7-48
7.16.1. Introducción	7-48
7.16.2. Informe de la rotura	7-48



GLOSARIO

ABANDONO. Cese definitivo de los trabajos de vertido en una escombrera.

ACELERACIÓN SÍSMICA DE CÁLCULO. Aquélla expresada en función de la aceleración de la gravedad, según una dirección horizontal, que se considera en los Estudios Sismorresistentes. En el caso de seísmos de origen natural se calcula a partir de la aceleración sísmica básica, a_b , y el coeficiente de riesgo, ρ .

ÁCIDO. Solución conteniendo una alta concentración de iones hidrógeno ($\text{pH}<7$).

ACUÍFERO. Formación geológica constituida por materiales permeables o fisurados capaz de almacenar y transportar un flujo significativo de agua.

AFLORAMIENTO. Parte del estrato de roca, veta, filón o capa que sobresale del terreno o se encuentra recubierto por depósitos superficiales.

AGUAS ÁCIDAS. Aquéllas que se forman por meteorización de minerales sulfurosos, simultáneamente a la acción catalizadora de bacterias.

ALCALINO. Solución que tiene cualidades de base ($\text{pH}>7$).

ALTURA DE LA ESCOMBRERA. Es la diferencia entre la cota de coronación (cresta del talud) y la del punto más bajo de la superficie de una escombrera (pie del talud).

ASENTAMIENTO. Modificación de la altura de una escombrera debido a la compactación producida por los equipos de transporte, la humedad o riego de las sucesivas tongadas.

AUTOCOMBUSTIÓN. Reacción de alguno de los componentes de los estériles, como los sulfuros, que al oxidarse dan lugar a una reacción exotérmica que puede provocar un aumento progresivo de la temperatura llegando a la ignición espontánea.

Glosario

AUSCULTACIÓN. Serie de actuaciones encaminadas al control de los diferentes parámetros que gobiernan la estabilidad y la seguridad general de una escombrera.

BENTONITA. Roca arcillosa, usada como impermeabilizante.

BERMA. Pequeñas superficies horizontales, estrechas y alargadas, que se dejan entre los bancos de un talud y que sirven como elemento de seguridad frente a desprendimientos, para el transporte de materiales y para la implantación de la vegetación.

BUZAMIENTO. Sentido en que se inclina una capa o filón.

CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO. Es el volumen de estériles que puede almacenar el depósito en cada etapa de su explotación o al finalizar su construcción.

CAPACIDAD DE CARGA. El nivel máximo de utilización que puede soportar una zona sin alterar sus características ecológicas.

CÁRCAVA (Barranco). Tipo de erosión. Abarrancamiento del terreno como consecuencia del paso continuo del agua de escorrentía a través de laderas pendientes y generalmente exentas de vegetación.

CARTOGRAFÍA OFICIAL. La realizada con sujeción a las prescripciones de la Ley 7/1986 (RDL 1986, 283), de Ordenamiento de la Cartografía, por las Administraciones Públicas o bajo su dirección y control.

CIMIENTO. Terreno sobre el que se asienta la escombrera.

CINEMÁTICA. Parte de la física que estudia el movimiento.

CLAUSURA. Acto de cerrar o abandonar definitivamente un depósito de lodos por su titular, obteniendo, previa presentación de un proyecto, un certificado o aprobación de la Autoridad Minera.

COEFICIENTE DE POISSON. Relación de las tensiones transversales compresivas a las tensiones de alargamiento cuando una varilla es estirada por fuerzas aplicadas en sus extremos y las cuales son paralelas al eje de dicha varilla.

COEFICIENTE DE SEGURIDAD. Valor numérico que se obtiene al dividir las fuerzas resistentes de una estructura entre las fuerzas desestabilizadoras.

COHESIÓN. Se llama así a la unión íntima entre las partículas que constituyen la roca.

COLADA. Fenómeno por el cual los materiales fluyen pendiente abajo, normalmente debido a la infiltración superficial o por oclusión de manantiales.

COLAPSO. Rotura súbita.

COMPACTACIÓN. Proceso mediante el cual un suelo disminuye el volumen y aumenta la densidad, al reducir su índice de poros.

CONDUCTIVIDAD. Propiedad de un material para transportar corriente eléctrica.

CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA. Propiedad que describe cuantitativamente la capacidad de un medio para dejar pasar el agua a través de él.

CONSOLIDACIÓN. Proceso por el que el suelo incoherente, blando o poco resistente, se transforma en coherente y firme. Modificación de un suelo saturado reaccionando al incremento de la carga, produciendo una migración del agua de los poros y una disminución del índice de huecos.

CONTAMINACIÓN. Descarga artificial de sustancias o energía en una concentración tal que produce efectos perjudiciales sobre el medio, incluido el hombre.

CRESTA DEL TALUD. Es la zona más elevada de la estructura resistente de la escombrera de estériles.

CUNETAS DE CONTORNO. Canales o surcos paralelos al contorno de una ladera que recoge y dirige el agua de escorrentía fuera del talud.

DECLARACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL. Dictamen efectuado por el organismo competente en medio ambiente, referente a la conveniencia o no de realizar un determinado proyecto.

DENSIDAD APARENTE. Cociente entre la masa de un cuerpo y su volumen.

DENSIDAD REAL. Relación entre la masa de una roca y su volumen descontando los poros.

DESECACIÓN. Disminución del contenido de humedad natural o de reabsorción.

DESLIZAMIENTO. Proceso de inestabilidad producido en una escombrera debido a la baja resistencia al corte entre los materiales que conforman la escombrera o en el contacto con el terreno natural (cimienta).

DESMUESTRE. Acción de tomar una muestra.

DRENAJE Proceso de descarga de agua mediante corrientes superficiales o conductos subterráneos.

DRENAJE ÁCIDO DE MINA (Aguas ácidas). Descarga de agua con un pH inferior a 7 que se produce como resultado de la oxidación natural de minerales sulfurosos contenidos en las rocas cuando son expuestas al aire y al agua.

DURABILIDAD. Resistencia de un material a alterarse.

E.I.A. Evaluación de Impacto Ambiental Conjunto de técnicas y metodologías encaminadas a valorar los impactos que sobre el medio producen determinadas obras, instalaciones y actividades.

EFLUENTE. Vertido generalmente líquido producido sobre una masa de agua, de origen industrial o urbano, constituido por sustancias o productos perjudiciales para el medio ambiente.

ELEMENTOS EN RIESGO. Población, edificaciones, obras de ingeniería civil, actividades económicas, servicios públicos, elementos medioambientales y otros usos del territorio que se encuentren en peligro en un área determinada.

Glosario

EMPLAZAMIENTO. Área elegida para la construcción de un depósito de estériles, después de considerar diversas características del terreno, proximidad a la explotación, etc.

EROSIÓN. Procesos químicos, físicos y biológicos que conducen al rebajamiento del relieve y pérdida del material.

E.S.I.A. Estudio de Impacto Ambiental. Documento técnico que debe presentar el titular del proyecto a partir del cual se efectuará la declaración de impacto ambiental.

EROSIÓN. Conjunto de procesos físicos y químicos por los que los materiales rocosos o los suelos son agrietados, disueltos o arrastrados de cualquier parte de la corteza terrestre.

EROSIÓN EN SURCOS. Fenómeno por el cual el agua de escorrentía superficial se concentra en líneas de máxima acumulación, produciendo pequeñas incisiones sobre el terreno.

EROSIÓN EÓLICA. Erosión provocada por la acción del viento.

EROSIÓN HÍDRICA. Erosión provocada por la acción de las aguas.

EROSIÓN LAMINAR. Tipo de erosión donde el agua de escorrentía fluye por toda la superficie, arrastrando las capas o materiales superficiales del suelo.

EROSIONABILIDAD. Propensión de un material a ser erosionado por la acción del agua o el viento.

ESCOLLERA. Bloques de roca de gran tamaño dispuestos para proteger ciertas estructuras del efecto erosivo del agua y mejorar la estabilidad.

ESCOMBRERA. Toda aquella acumulación de materiales gruesos procedentes de monteras o recubrimientos estériles, rechazo de las instalaciones de machaqueo, excavación de galerías, etc.

ESTABILIZACIÓN. Tratamiento mecánico o físico-químico ejecutado con objeto de mantener o mejorar las características geotécnicas de los materiales.

ESTÉRIL. Material rocoso o residuo no aprovechable procedente de las labores de extracción minera.

FASE DE CONSTRUCCIÓN Y TRABAJOS PREPARATORIOS. Conjunto de trabajos a realizar siguiendo el diseño y especificaciones técnicas del proyecto, antes de proceder a la deposición de estériles.

FASE DE DISEÑO. Aquélla en la que se procede a la elaboración de todos los documentos del proyecto, y especialmente planos y especificaciones técnicas, para la construcción de una escombrera en un emplazamiento determinado.

FASE DE ELECCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO, PLANIFICACIÓN Y CONCEPTUALIZACIÓN. Comprende la elección de un lugar, la concepción de un prediseño y la planificación del sistema de deposición de estériles.

FASE DE EXPLOTACIÓN U OPERACIÓN. Aquélla durante la cual se procede al vertido de estériles en el depósito.

FASE DE INVESTIGACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS ESTÉRILES. Comprende el conjunto de investigaciones y ensayos para determinar las características del emplazamiento, de los materiales a ser empleados en la construcción, de los estériles vertidos, y también los principales parámetros ambientales.

FASE DE MANTENIMIENTO Y CONTROL. Comprende el período después de la clausura del depósito durante el cual el titular velará por la seguridad y controlará sus efectos sobre el medio ambiente.

FASE DE PUESTA EN MARCHA. Etapa inicial previa a la fase de explotación que puede exigir una serie de actividades diferentes a las rutinarias durante el vertido de estériles.

FASE DE RESTAURACIÓN. Utilización de los terrenos de una escombrera ya abandonada ó clausurada o con una zona, con vistas a su recuperación ambiental con uno similar o distinto al original.

FIANZA. Depósito, aval o cualquier otra forma de garantía que el promotor debe presentar para afianzar el cumplimiento del plan de restauración y protección ambiental afectado por labores mineras.

FILTRO ROCOSO. Estructura construida con fragmentos de roca de diferentes tamaños para retener o atrapar sedimentos y dejar circular el agua.

GEOSINTÉTICO. Láminas fabricadas con materiales sintéticos que se utilizan con diferentes fines- drenaje, impermeabilización, etc.- cubriendo superficies de materiales naturales.

GEOTEXTIL. Geosintético destinado a operaciones de filtro.

IMPACTO AMBIENTAL. Efecto que las actuaciones humanas producen en el medio. La intensidad de la alteración está relacionada con la capacidad de acogida del territorio donde se desarrolla la actividad impactante.

Cualquier cambio del medio ambiente, beneficioso o adverso, que resulta total o parcialmente del desarrollo de una actividad o proyecto.

IMPERMEABLE. Material que no es capaz de permitir el paso de agua, o que sólo lo permite con dificultad

INFILTRACIÓN. Acto o proceso de pasar una sustancia a través de algo.

INYECCIÓN. Sondeos destinados a introducir en el interior de los depósitos de estériles fluidos de diversas características, como por ejemplo de bentonita, cal, etc.

LIBRO DE REGISTRO. Documento en el que cronológicamente y desde la fase de construcción el titular reflejará todas las incidencias relevantes durante toda la vida del depósito de lodos. Cada incidencia será descrita y fechada e irá acompañada de la firma del Director Facultativo.

LICUEFACCIÓN. Fenómeno consistente en la elevación de la presión de poro debida a un movimiento sísmico que provoca que los sólidos se comporten como un fluido denso con resistencia al corte muy pequeña o nula.

LIXIVIACIÓN. Extracción de un compuesto soluble de un mineral por medio de un disolvente adecuado.

Glosario

MEDIO AMBIENTE. Conjunto de condiciones físicas, químicas y biológicas que rodean a un organismo.

METEORIZACIÓN. Conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos naturales que conducen a la desagregación mecánica y descomposición química de los materiales rocosos expuestos a los efectos de la intemperie.

MINERAL. Sustancia natural que tiene una composición química determinada y que siempre se presenta bajo la misma forma cristalina.

MINERÍA. Técnicas y actividades dirigidas al descubrimiento y explotación de yacimientos de minerales.

MULTICRITERIO. Técnica de evaluación de alternativas.

NIVEL FRÉATICO. Límite superior, no estático de la zona saturada de agua en el subsuelo.

NIVEL PIEZOMÉTRICO (Nivel hidrostático). Nivel superior del agua en un pozo perforado o en una capa acuífera.

OXIDACIÓN. Alteración química de una sustancia por pérdida de electrones, o en presencia de oxígeno.

PELIGRO. Riesgo potencial de un depósito de lodos de causar daños en los elementos de riesgo como consecuencia de rotura o funcionamiento defectuoso.

PELIGROSIDAD. Probabilidad de ocurrencia de una rotura y consecuente deslizamiento de estériles dentro de un área dada.

PERCOLACIÓN. Movimiento del agua o de otros líquidos, sometido a la presión hidrostática natural de la subsuperficie de la tierra, a través de los intersticios del suelo o de la tierra.

PERMEABILIDAD. Capacidad de un material para transmitir fluidos.

pH. Medida química que indica la concentración de iones hidrogeno en el suelo. Un valor igual a 7 corresponde a una solución neutra, mientras que si es menor es ácida y si es superior es básica.

PIE DEL TALUD. Es la zona más baja perteneciente al talud.

PIEZÓMETRO. Sistema de medida para el control de las presiones intersticiales en el terreno.

PLAN DE EMERGENCIA. Documento que recoge la organización de los recursos humanos y materiales necesarios para el control de los factores de riesgo que puedan comprometer la seguridad de una escombrera, así como los sistemas de información, alerta y alarma que se establezcan para facilitar la puesta en disposición preventiva de los servicios y recursos que hayan de intervenir para la protección de los elementos de riesgo en caso de rotura o funcionamiento defectuoso del depósito.

PLASTICIDAD. Propiedad que permite al material sufrir deformaciones sin recuperación elástica perceptible y sin resquebrajarse ni desmenuzarse.

PORO. Espacio en una roca que, en algunos casos, está relleno de agua y/o sales.

POROSIDAD. Relación entre el volumen ocupado por los gases y líquidos presentes en una porción de suelo respecto al volumen total de la misma.

Volumen de huecos de un residuo minero expresado como un porcentaje del volumen total.

PRECIPITACIÓN. Caída sobre la superficie terrestre del vapor de agua condensado en la atmósfera (nubes y niebla). Puede producirse en forma de lluvia, nieve, aguanieve y granizo.

PRESIÓN DE PORO. La ejercida por el agua ocluida entre las partículas sólidas.

PROYECTO. Conjunto de estudios debidamente estructurados en varios documentos (memoria, planos, pliego de condiciones, presupuestos, anexos) que reflejan como se ha de preparar el terreno a ocupar, como se ha de construir la escombrera y el coste de ejecución de la misma.

RECRECIMIENTO. Elevación del frente de vertido de una escombrera con los propios materiales estériles y en capas horizontales.

RECUBRIMIENTO. Material que es preciso mover para descubrir la roca aprovechable.

RECUPERACIÓN (Rehabilitación). Acciones destinadas a devolver a los terrenos degradados la posibilidad de soportar uno o más usos del suelo, sin perjuicio del medio ambiente.

REMODELADO. Trabajos de movimientos de estériles de una escombrera destinados a alcanzar unas geometrías adecuadas para implantar la vegetación y evitar los procesos erosivos.

RESISTENCIA A TRACCIÓN. Tensión máxima que puede resistir sin romperse un material sometido a una carga de tracción.

RESISTENCIA AL CORTE. Capacidad de un material para resistir los esfuerzos de corte.

RESISTENCIA DE PICO. Máximo esfuerzo que puede soportar una roca o suelo bajo unas condiciones determinadas.

RESISTENCIA RESIDUAL. Resistencia a capacidad de carga que presenta una roca o suelo tras una deformación considerable posterior a la resistencia de pico.

RESTAURACIÓN. Acciones destinadas a devolver al terreno las condiciones de uso existentes con anterioridad a la actividad impactante.

REVEGETACIÓN. Plantación o siembra de especies vegetales en terrenos alterados.

RIESGO. Número esperado de víctimas, daños materiales y desorganización de la actividad económica, subsiguientes a la rotura o funcionamiento incorrecto de una escombrera. También probabilidad de que un suceso concreto ocurra en un momento determinado.

Glosario

RITMO DE VERTIDO. Velocidad de vertido de los materiales en una escombrera. Suele expresarse en metros cúbicos por metro y día.

RODADURA. Movimiento giratorio de los bloques de roca vertidos sobre el talud de una escombrera que les permite alcanzar puntos del terreno más allá del pie de los depósitos.

ROZAMIENTO. Fuerza que se opone al movimiento relativo de dos cuerpos siempre que exista dicho movimiento o cuando existan otras fuerzas que tienden a producir movimiento.

SEDIMENTO. Partícula de tierra o material rocoso que ha sido erosionado.

SEGREGACIÓN. Fenómeno por el cual las partículas gruesas se depositan por efecto de la gravedad en las proximidades al punto de vertido, separándose de las finas más finas que lo hacen a distancias mayores.

SUBSIDENCIA. Hundimiento progresivo del fondo de una fosa o depresión que se desarrolla paralelamente a la sedimentación depositada en ella.

SUELO. Parte de los materiales incoherentes que recubre a las rocas y que es capaz de sostener vida vegetal.

SUSTANCIAS TÓXICAS. Conjunto de compuestos o elementos que tienen un efecto venenoso sobre los seres vivos (metales pesados y cationes tóxicos).

TALUD. Inclinación natural o artificial de la superficie del terreno.

TIERRA VEGETAL (Suelo vegetal). Horizonte superficial del suelo (A) que contiene la mayor proporción de materia orgánica y presenta las condiciones edáficas más adecuadas para el crecimiento de la vegetación.

TODO-UNO. Material tal y como sale de una explotación, sin que se le haya aplicado ninguna forma de selección o tratamiento.

TOPOGRAFÍA. Contorno o geometría de la superficie de la tierra. Normalmente, se representa en un mapa mediante líneas que conectan puntos de igual altitud.

TOXICIDAD. Grado de envenenamiento de una sustancia tóxica.

TRANSMISIVIDAD. Caudal que bajo un gradiente unidad y una temperatura fija, se filtra a través de una franja vertical de terreno, de superficie unidad y altura igual a la de la capa saturada.

UNIDADES. Se recomienda utilizar las del Sistema Internacional (Real Decreto 1317/1989, B.O.E. del 27 octubre) y en particular las siguientes:

Cotas: metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.)

Longitud: metros (m)

Volumen: metros cúbicos (m³)

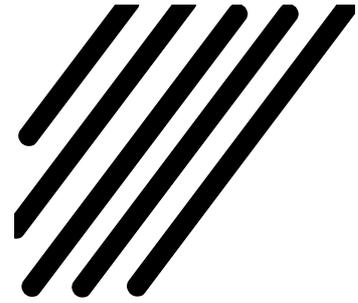
Masa: toneladas (t).

VERTIDO. Acción de depositar estériles rocosos en una escombrera mediante la elevación de las cajas de los volquetes, con empuje de tractores o con cintas de los brazos de los apiladores.

YACIMIENTO. Depósito mineral cuyo grado de concentración o ley mineral hace que sea económicamente rentable su explotación.

ZANJAS DE INTERCEPCIÓN. Construcciones realizadas ladera arriba de la escombrera utilizadas para la recogida de aguas de escorrentía.

ZONA DE INFLUENCIA. Aquella zona que pueda ser afectada por caída de estériles, deslizamientos globales o parciales, flujos de detritus, etc.



BIBLIOGRAFÍA

- ACKMAN, T. (1984).: "In-line Aeration and Treatment of Acid Mine Drainage". United States Department of the Interior. Pittsburgh. EE. UU.
- ADAM, D.G., CARTER, J., DONALD, D. y LORD, E. (1985).: "Tecnología Europea de Escombreras". Lignitos de Meirama. España.
- ALLGAIER, F. (1982).: "Surface Subsidence Over Longwall Panels in the Western". United States Department of the Interior. Utha. EE. UU.
- ANN, G., BERNICE, S. y HEISEY, R. (1982).: "Acid Mine Drainage: Control and Abatement Research". United States Department of the Interior. Pittsburgh. EE. UU.
- AYALA CARCEDO, F.J. et al. (1986).: "Manual para el Diseño y Construcción de Escombreras y Presas de Residuos Mineros". ITGE. España.
- AYALA, F.J. y RODRÍGUEZ, J.M.: "Recomendaciones para el Proyecto y Ejecución de Escombreras en la Minería del Carbón". Industria Minera.
- BARTON, M. (1982).: "Shear Strength Investigation for Surface Mining". Stability in Surface Mining. Vol. 3. AIME.
- BRAWNER, C.O. y DORLING, I.P.F. (1978).: "Stability in Coal Mining". Miller Freeman Publications. San Francisco. EE. UU.
- BRITISH COLUMBIA MINE WASTE ROCK PILE RESEARCH COMMITTEE (1991).: "Mined Rock and Overburden Piles. Investigation and Design Manual". North Vancouver. Canadá.
- BRITISH COLUMBIA MINE WASTE ROCK PILE RESEARCH COMMITTEE (1991).: "Mined Rock and Overburden Piles. Operating and Monitoring Manual". North Vancouver. Canadá.

Bibliografía

- BUREAU OF MINES (1977).: “Design Guide for Metal and Nonmetal Tailing Disposal”. IC 8755. EE. UU.
- BUREAU OF MINES. (1981).: “Mine Waste Disposal Technology”. Denver, Colorado, EE. UU.
- BUREAU OF MINES. (1985).: “Mine Subsidence Control”. United States Department of the Interior. Pittsburgh. EE. UU.
- BUREAU OF MINES. (1985).: “Control of Acid Mine Drainage”. United States Department of the Interior. Pittsburgh. EE. UU.
- CALDWELL, J. A. (1983).: “The use of stage curves in the design and operation of tailings impoundments”. CIM Bulletin. Volume 76. Nº 850. February.
- CALDWELL, J.A., ROBERTSON, S. y KIRSTEN.: “Decision Making Analysis in Mine Planning: a Case History”. Denver, Colorado. EE. UU.
- CANMET. (1979).: “Pit Slope Manual - Waste Embankments”. Energy, Mines and Resources. Ottawa. Canadá.
- CASAGRANDE, L. y McIVER, B. N.: “Design and Construction of Tailings Dams”. Proceedings of the First International Conference on Stability in Open Pit Mining. Edit. Brawner y Milligan. AIME.
- CEDEX (1995).: “Curso de Geotecnia de Obras Lineales”. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente.
- CHIRONIS, N.P. (1978).: “Better Ways to Build Hollow Fills”. Coal Age.
- CLARIDGE, F.B. et al. (1986).: “Mine Waste Dump Constructed in Mountain Valleys”. CIM Bulletin.
- COATES, D. y YU, Y. (Eds.) (1977).: “Waste Embankments”. Pit Slope Manual Chapter 9. Canada Centre for Mineral and Energy Technology. Ottawa. Report 77-1.
- DEPARTMENT OF THE NAVY BUREAU OF YARDS AND DOCKS (1962). “Soil Mechanics, Foundations, and Earth Structures”. Washington, EE. UU.
- DOUGLAS, P.M. y BAILEY, M.J. (1982).: “Evaluation of Surface Coal Mine Spoil Pile Failures”. Stability in Surface Mining. Vol. 3. AIME.
- DUNCAN, J.M. (1996).: “Soil slope stability analisis”. Landslides. Investigation and Mitigation. Chapter 13. Special Report 247. Transportation Research Board.
- FELL, R., MacGREGOR, P. y STAPLEDON, D. (1992).: “Geotechnical Engineering of Embankment Dams”. A.A. Balkema. Rotterdam. Holanda.
- ENDICOTT, D.R. y WARNOCK, G. D. (1999).: “Design and Construction of Bodie Waste Rock Dump”. Elkview Coal Corporation.

- ENVIRONMENT AUSTRALIA (1997).: “Managing Sulphidic Mine Wastes and Acid Drainage”. Best Practice Environmental Management in Mining.
- FINN, W. (1982).: “Fundamental Aspects of Response of Tailings Dams to Earthquakes”. Dynamic Stability of Tailings Dams. ASCE.
- FUNDACIÓN GÓMEZ PARDO (1994).: “Curso sobre Diseño y Construcción de Escombreras y Presas de Residuos”. E.T.S.I.M. Madrid. España.
- GONZÁLEZ, J. y GARCÍA, J.M. (1986).: “Los Estériles de Menudo de Lavaderos de Carbón como Material para la Construcción de Terraplenes”. Carreteras.
- HOEK, E. y BRAY, J.W. (1981).: “Rock Slope Engineering”. The Institution of Mining and Metallurgy.
- HUANG (1983).: “Stability analysis of earth slopes”. Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- INTERNATIONAL JOURNAL OF SURFACE MINING, RECLAMATION AND ENVIRONMENT (1999).; A.A. Balkema, Rotterdam.
- INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON STABILITY IN COAL MINING. (1978). Vancouver, Canadá.
- LIGHTHALL, P.C., SELLARS, C.D. y BURTON, W.D. (1985).: “Design of Waste Dumps with Flow-through Rock Drains”. Vancouver, Canadá.
- LÓPEZ JIMENO, C. et al. (1996).: “Manual de Restauración de Terrenos y Evaluación de Impactos Ambientales en Minería”. ITGE. España.
- MARCUS, J.J. (1997).: “Mining Environmental Handbook”. Imperial College Press.
- McNAY, L.M.: “Coal Refuse Fiers, and Environmental Hazard”. Bureau of Mines. IC 8515.
- MINER (1999).: Borrador de la “Instrucción Técnica Complementaria sobre Escombreras de Estériles Mineros”.
- MINISTERIO DE FOMENTO (1998).: “AE - 88. Acciones en la edificación”. Serie normativas. Norma Básica de la Edificación (N.B.E.). Centro de Publicaciones. Secretaría General Técnica. Ministerio de Fomento. Madrid.
- MITTAL, H. y MORGENSTERN, N. (1975).: “Parameters for the Design of Tailings Dams”. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 12.
- NICHOLS, R.S. y RUTLEDGE, A.L. (1982).: “Water Drainage Throught Waste Dumps at Fording Coal Limited”. CIM Bulletin.
- NICHOLS, R.S. (1986).: “Rock Segregation in Waste Dumps”. Esso Resource Canada Limited, Calgary.
- NICHOLS, R.S. (1982).: “Waste Dump Stability at Fording Coal Limited in B.C.”. Stability in Surface Mining. Vol. 3. AIME.

Bibliografía

- RAINBOW, A.K.M. (1989): "Reclamation, Treatment and Utilitation of Coal Mining Waste". Proceedings of the Second International Conference.
- ROBINS, J.D. (1978): "Constructing Spoil Storage Fills in the Sleep Terrain Appalachian Coalfields". Stability in Coal Mining. Miller Freeman. Publ.
- ROBINSKY, E. I. (2000): "Suitainable development in disposal of tailigs". En tailigs and Mine Waste '00. A.A. Balkema.
- SEED, H. (1973): "Stability of Earth and Rockfill Dams during Earthquakes". Embankment-Dam Engineering. Hirschfeld y Poulos (eds.), Wiley. New York.
- SEED, H. (1976): "Evaluation of Soil Liquefaction Effects on Level Ground During Earthquakes". Liquefaction Problems in Geotechnical Engineering. ASCE.
- RODRÍGUEZ ORTIZ, J.M. (1987): " Auscultación y Corrección de Movimientos del Terreno". Riesgos Geológicos. IGME.
- SERRA DE RENOBALLES, T. (1988): "La Concepción de Vertederos, Condición Previa para Posibilitar la Restauración en Minería a Cielo Abierto". I Seminario sobre la Restauración de Canteras y Minas a Cielo Abierto. Fundación Gómez Pardo, Madrid.
- SERVICE TECHNIQUE DE L'URBANISME. (1986): "Sols Stériles: Réaménagement et Végétalisation"
- SINGHAL, R.K. (1986): "Geotechnical Stability in Surface Mining". Balkema. Rotterdam.
- SMITH, L., LÓPEZ, D.L., BECKIE, R., MORIN, K., DAWSON, R. y PRICE, W.A. (1995): "Hidrogeology of Waste Rock Dumps". British Columbia, Canadá.
- UNESA-ASINEL. (1988): "Cubrimiento Vegetal de Escombreras de Cenizas Volantes".
- VARIOS AUTORES (1999): "Tailings and Mine Waste '99". Proceedings of the sixth International Conference on Tailings and Mine Waste. Edit. A. A. Balkema. Fort Collins. Colorado. EE.UU.
- VARIOS AUTORES (1998): "Tailings and Mine Waste '98". Proceedings of the Fifth International Conference on Tailings and Mine Waste. Edit. A. A. Balkema. Fort Collins. Colorado. EE.UU.
- VICK, S. et al. (1983): "Planning, Design and Analysis of Tailings Dams". Ed. Wiley.
- WILLIAMSON, N.N. et al. (1982): "Mine Waste Reclamation". Mining Journal Books.